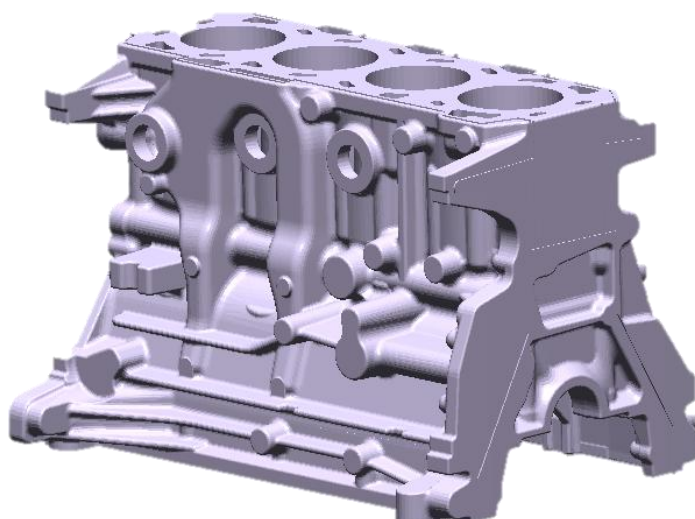


## **OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE GITAGEM PARA REDUÇÃO DE BOLHAS E METAL FRIO NO CÁRTER CILINDRO 650 DA FUNFRAP**



**BRUNO ALEXANDRE CALÓ BATISTA**

Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Dissertação realizada sob a supervisão do Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e do Engenheiro Martinho Fernandes da empresa Funfrap – Grupo Teksid

MIEMM

Porto, Julho de 2013

<b>Candidato</b>	Bruno Alexandre Caló Batista		<b>Código</b> 200605183
<b>Título</b>	Otimização do Sistema de Gitagem para Redução de Bolhas e Metal Frio no Cárter Cilindro 650 da Funfrap		
<b>Data</b>	16 de Julho de 2013		
<b>Local</b>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Sala F103 – 11:00h		
<b>Júri</b>	<b>Presidente</b>	Professora Doutora Laura Maria Melo Ribeiro	DEMM/FEUP
	<b>Arguente</b>	Professor Doutor Hélder Jesus Fernandes Puga	DEM/EEUM
	<b>Orientador</b>	Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro	DEMM/FEUP

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar ao Professor Doutor Carlos Silva Ribeiro a orientação e a oportunidade de realizar a Dissertação na área de fundição, numa empresa como a Funfrap.

Quero também agradecer ao Doutor Idílio Fernandes que tornou possível o desenvolvimento desta tese de Mestrado em ambiente industrial, assim como, ao Eng.º Martinho Fernandes que, como meu orientador na empresa, me aconselhou e ajudou sempre que foi necessário. Aos Eng.ºs João Castro e Pedro Rocha que me acompanharam mais diretamente, e a todas as pessoas pertencentes ao departamento técnico como os Srs. Luís Saraiva, Virgílio Ratola, Paulo Silva, Eduardo Mortágua e Paulo Nunes, que me ajudaram, quer diretamente na tese, como na integração à empresa.

Aos meus pais, por me darem todas as condições para poder concluir com sucesso todo o meu percurso académico, e por todo o Amor e dedicação que sempre me deram ao longo da vida. E ao meu irmão que esteve sempre presente.

Um agradecimento especial à minha namorada Patrícia Machado, por todo o seu Amor, por toda a ajuda e incentivo ao longo do meu curso, e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus amigos e colegas que, de uma maneira ou de outra, fizeram parte do meu percurso.

A todos, muito obrigado.

## RESUMO

A Dissertação é parte integrante do curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e é realizada em parceria com a empresa de fundição Funfrap S.A. do Grupo Teksid.

Alguns defeitos esporádicos de fundição, nomeadamente bolhas e metal frio, em cárteres cilindro 650, em ferro fundido lamelar, deram origem ao estudo das causas potenciais para o seu aparecimento, tendo em vista a melhoria contínua do processo. As bolhas e metal frio chegam a representar 27% dos defeitos encontrados no 650 e encontram-se em primeiro no Diagrama de Pareto dos defeitos.

O objectivo proposto é acompanhar o ciclo de produção do 650 e diagnosticar as possíveis causas que levam ao aparecimento de bolhas e metal frio, assim como o estudo e proposta de um sistema de gitagem para a redução destes defeitos.

Para as alterações propostas ao sistema de gitagem foi utilizado o *software* de modelação *Unigraphics* e para a simulação utilizou-se o *MagmaSoft*. Com os resultados das simulações foi possível propor e validar experimentalmente um sistema de gitagem optimizado com o objectivo de reduzir as bolhas e metal frio.

Através do acompanhamento do ciclo de produção foi possível melhorar o modo de vazamento, em que tempos rápidos foram preteridos ao vazamento sem transvaze de metal para fora da bacia de vazamento e, portanto, sem entrar pelos respiros, como foi verificado inicialmente. Esta mudança permitiu uma redução da sucata geral e fundamentalmente, uma redução da percentagem de bolhas, podendo ser considerada a principal causa para o seu aparecimento.

## CONTEÚDOS

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>II</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. FUNFRAP S.A. – GRUPO TEKSID .....	1
1.2. DESCRIÇÃO GENÉRICA DO CÁRTER CILINDRO .....	2
1.3. DIMENSÕES DA PEÇA E DA CAIXA DE MOLDAÇÃO .....	2
1.4. SISTEMA DE GITAGEM .....	3
1.5. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS BOLHAS E METAL FRIO .....	4
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1. FERRO FUNDIDO LAMELAR .....	6
2.2. PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE .....	7
2.2.1. <i>Características gerais da areia</i> .....	7
2.2.2. <i>Princípio de funcionamento</i> .....	8
2.2.3. <i>Preparação da areia</i> .....	10
2.2.4. <i>Preparação da mistura</i> .....	10
2.3. BOLHAS.....	11
2.4. METAL FRIO .....	13
2.5. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS - LÍQUIDOS PENETRANTES.....	15
2.6. SISTEMA DE GITAGEM.....	15
2.7. RELAÇÃO DE GITAGEM .....	16
2.8. DINÂMICA DE FLUÍDOS .....	17
2.8.1. <i>Lei da continuidade</i> .....	17
2.8.2. <i>Lei da conservação de energia (Equação de Bernoulli)</i> .....	17
2.8.3. <i>Lei de Torricelli</i> .....	17
<b>3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>18</b>

3.1.	ANÁLISE DE SUCATA .....	19
3.2.	AREIA.....	19
3.3.	VAZAMENTO .....	19
3.4.	GITAGEM.....	19
3.5.	FILTRAGEM .....	20
3.6.	MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO .....	20
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>22</b>
4.1.	PARÂMETROS DA AREIA .....	22
4.2.	GITAGEM.....	23
4.2.1.	<i>Pontos quentes</i> .....	23
4.2.2.	<i>Área da secção característica (<math>A_{scsg}</math>)</i> .....	24
4.2.3.	<i>Relação de gitagem</i> .....	26
4.3.	SIMULAÇÕES .....	27
4.3.1.	<i>Atual</i> .....	27
4.3.2.	<i>Etapa 1</i> .....	32
4.3.3.	<i>Etapa 2</i> .....	34
4.3.4.	<i>Etapa 3</i> .....	37
4.3.5.	<i>Etapa 4</i> .....	39
4.4.	ENSAIOS .....	42
4.4.1.	<i>Ensaio 1, 2 e 3</i> .....	43
4.4.2.	<i>Ensaio 4</i> .....	43
4.4.3.	<i>Ensaio 5 e 6</i> .....	44
4.4.4.	<i>Ensaio 7 e 8</i> .....	45
4.4.5.	<i>Ensaio 9</i> .....	45
4.4.6.	<i>Ensaio 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16</i> .....	46
4.4.7.	<i>Ensaio 17</i> .....	46
4.5.	TEMPERATURAS DE VAZAMENTO.....	47
4.6.	ANÁLISE GLOBAL E ESTIMATIVAS .....	48
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>
<b>7.</b>	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>53</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA GENÉRICO DE UM BLOCO DE MOTOR. ADAPTADO DE [2].	2
FIGURA 2- DIMENSÕES DAS PEÇAS (ESQ.) E DA CAIXA DE MOLDAÇÃO (DIR.) EM MILÍMETROS.	2
FIGURA 3 – VISTA EM XX (ESQ.) E EM ZZ (DIR.) DO SISTEMA DE GITAGEM ATUAL.	3
FIGURA 4 – DESENHO 3D DO CONJUNTO DOS MACHOS CILINDROS.	3
FIGURA 5- LOCALIZAÇÕES MAIS CRÍTICAS DE OCORRÊNCIA DE BOLHAS.	4
FIGURA 6 - APARECIMENTO SIMULTÂNEO DE BOLHA E METAL FRIO NO RETORNO DE ÓLEO.	4
FIGURA 7 – ESQUEMA DO SISTEMA DE GITAGEM E DOS DOIS MODELOS (ESQ.) E A DISTRIBUIÇÃO DA PERCENTAGEM RELATIVA DE BOLHAS POR ZONA (DIR.).	5
FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO DA PERCENTAGEM RELATIVA DE METAL FRIO POR ZONA NO MODELO 1 E 2.	5
FIGURA 9 - RELAÇÃO ENTRE O CARBONO EQUIVALENTE, A ESPESSURA DE SECÇÃO E A ESTRUTURA.	7
FIGURA 10 - ESQUEMA DE UMA GALGA [11].	8
FIGURA 11 - GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A VERDE E O TEOR DE HUMIDADE, VARIANDO O TEOR DE BENTONITE. ADAPTADO DE [12].	9
FIGURA 12 – CURVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A VERDE COM O TEMPO DE MISTURA. ADAPTADO DE [12].	10
FIGURA 13 - FLUXOGRAMA DO CICLO DA AREIA VERDE. ADAPTADO DE [27].	11
FIGURA 14 - FORMAÇÃO DE BOLHAS À SUPERFÍCIE DE UM RADIADOR EM FERRO FUNDIDO CINZENTO [15].	12
FIGURA 15 - DIAGRAMA DE ISHIKAWA PARA A FORMAÇÃO DE BOLHAS NOS FUNDIDOS.	12
FIGURA 16 - EXEMPLO (ESQ.) E ESQUEMA (DIR.) DA FORMAÇÃO DE METAL FRIO.	13
FIGURA 17 - DIAGRAMA DE ISHIKAWA PARA A FORMAÇÃO DE METAL FRIO NOS FUNDIDOS.	14
FIGURA 18 – ENSAIO DE LÍQUIDOS PENETRANTES NA ZONA DO RO2.	15
FIGURA 19 – COMPONENTES BÁSICOS DUM SISTEMA DE GITAGEM SIMPLES PARA MOLDAÇÃO HORIZONTAL. ADAPTADO DE [22].	16
FIGURA 20 – LOCALIZAÇÃO DOS RESPIROS E AGULHAS NA PLACA MOLDE SUPERIOR.	21
FIGURA 21 - PONTOS QUENTES NA SIMULAÇÃO EM VAZIO DA PEÇA EM <i>SOLIDCAST</i> . DA ESQUERDA PARA A DIREITA SÃO AS VISTAS EM YY, EM XX E EM ZZ.	23
FIGURA 22 - LOCALIZAÇÃO DOS ATAQUES NO SISTEMA DE GITAGEM ATUAL.	24

FIGURA 23 - COEFICIENTE DE ATRITO.....	25
FIGURA 24 – AVALIAÇÃO DO FINAL DO ENCHIMENTO ATRAVÉS DO CRITÉRIO <i>Air Entrapment</i> . A VERMELHO DESTACAM-SE AS ZONAS CRÍTICAS DE APRISIONAMENTO DE GÁS NO SISTEMA ATUAL.....	28
FIGURA 25 – AVALIAÇÃO DO FINAL DO ENCHIMENTO ATRAVÉS DO CRITÉRIO DA TEMPERATURA. OS QUADRADOS AZUIS DESTACAM AS ZONAS CRÍTICAS DE TEMPERATURA MAIS BAIXA NO SISTEMA ATUAL. ....	29
FIGURA 26 – AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE A 18% DE ENCHIMENTO. O CÍRCULO VERMELHO DESTACA A ZONA COM VELOCIDADE MAIS ELEVADA DO SISTEMA ATUAL. ....	29
FIGURA 27 – AVALIAÇÃO DO ENCHIMENTO PELO CRITÉRIO <i>Fill Tracer</i> PERTO DO FIM DO ENCHIMENTO NO SISTEMA ATUAL. ....	30
FIGURA 28 – AVALIAÇÃO DO ENCHIMENTO DO SISTEMA DE GITAGEM ATUAL ATRAVÉS DO CRITÉRIO DA TEMPERATURA, COM A OPÇÃO <i>X-Ray</i> ATIVADA.....	30
FIGURA 29 – ESQUEMA DO PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO DE UM RESPIRO NA FACE LATERAL JUNTO A H7.....	31
FIGURA 30 – AVALIAÇÃO DO FINAL DO ENCHIMENTO NA ETAPA 1 ATRAVÉS DO CRITÉRIO <i>Air Entrapment</i> .....	32
FIGURA 31 – AVALIAÇÃO DO FINAL DO ENCHIMENTO ATRAVÉS DO CRITÉRIO DA TEMPERATURA. OS QUADRADOS AZUIS DESTACAM AS ZONAS CRÍTICAS DE TEMPERATURA MAIS BAIXA NA ETAPA 1.....	33
FIGURA 32 – AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE A 18% DE ENCHIMENTO. OS CÍRCULOS VERMELHOS DESTACAM AS ZONAS COM VELOCIDADE MAIS ELEVADA NA ETAPA 1. ....	33
FIGURA 33 – AVALIAÇÃO NO FINAL DO ENCHIMENTO DO SISTEMA DE GITAGEM, ATRAVÉS DO CRITÉRIO <i>Air Entrapment</i> , NA ETAPA 2. ....	34
FIGURA 34 – AVALIAÇÃO DO FINAL DO ENCHIMENTO ATRAVÉS DO CRITÉRIO DA TEMPERATURA NA ETAPA 2. ....	35
FIGURA 35 – AVALIAÇÃO DO ENCHIMENTO PELO CRITÉRIO <i>Fill Tracer</i> PERTO DO FIM DO ENCHIMENTO NA ETAPA 2. ....	36
FIGURA 36 – AVALIAÇÃO DO ENCHIMENTO DO SISTEMA DE GITAGEM ATRAVÉS DO CRITÉRIO DA TEMPERATURA COM A OPÇÃO <i>X-Ray</i> ATIVADA NA ETAPA 2. ....	36
FIGURA 37 – DESENHO DE UM RAIO NOS PRIMEIROS ATAQUES E REDUÇÃO DE 5% NOS ATAQUES POSTERIORES PARA MODIFICAÇÃO NA PLACA MOLDE.....	37
FIGURA 38 – AVALIAÇÃO DO FINAL DO ENCHIMENTO ATRAVÉS DO CRITÉRIO <i>Air Entrapment</i>	



NA ETAPA 3. ....	37
FIGURA 39 – AVALIAÇÃO DO FINAL DO ENCHIMENTO ATRAVÉS DO CRITÉRIO DA TEMPERATURA. OS QUADRADOS AZUIS DESTACAM AS ZONAS CRÍTICAS DE TEMPERATURA MAIS BAIXA NA ETAPA 3.....	38
FIGURA 40 – AVALIAÇÃO DO ENCHIMENTO PELO CRITÉRIO <i>FILL TRACER</i> PERTO DO FIM DO ENCHIMENTO NA ETAPA 3. ....	38
FIGURA 41 – AVALIAÇÃO DO ENCHIMENTO NA ETAPA 3 ATRAVÉS DO CRITÉRIO DA TEMPERATURA, COM A OPÇÃO <i>X-RAY</i> ATIVA. ....	39
FIGURA 42 - AVALIAÇÃO DO FINAL DO ENCHIMENTO ATRAVÉS DO CRITÉRIO <i>AIR ENTRAPMENT</i> . OS CÍRCULOS VERMELHOS DESTACAM AS ZONAS CRÍTICAS DE APRISIONAMENTO DE GÁS NA ETAPA 4.....	40
FIGURA 43 - AVALIAÇÃO DO FINAL DO ENCHIMENTO ATRAVÉS DO CRITÉRIO DA TEMPERATURA NA ETAPA 4 (ESQ.) E UM PORMENOR DO ENCHIMENTO ATRAVÉS DO MESMO CRITÉRIO COM A OPÇÃO <i>X-RAY</i> ATIVA (DIR.).....	41
FIGURA 44 - AVALIAÇÃO DO ENCHIMENTO PELO CRITÉRIO <i>FILL TRACER</i> , ANTES DE ENTRAR METAL PELO RESPIRO (ESQ.) E PERTO DO FIM DO ENCHIMENTO (DIR.) NA ETAPA 4. ....	41
FIGURA 45 - AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE A 22% DE ENCHIMENTO NA ETAPA 4.....	42
FIGURA 46 – AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE ABSOLUTA NUM PONTO EM CADA MODELO, A 98% DE ENCHIMENTO, ATRAVÉS DA FUNÇÃO <i>PICKING</i> DO <i>MAGMA</i> <i>SOFT</i> . À ESQUERDA É APRESENTADO O CRITÉRIO DA VELOCIDADE NA ETAPA 4, E À DIREITA NA ETAPA 3. ....	44
FIGURA 47 – HISTOGRAMA DAS TEMPERATURAS DE CADA COLHER ANTES DO VAZAMENTO. ....	47
FIGURA 48 - VARIAÇÃO DA PERCENTAGEM DE SUCATA E DEFEITOS AO LONGO DOS ENSAIOS EM COMPARAÇÃO COM OS DADOS DE 2013.....	48

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CÓDIGO DE CORES PARA A % RELATIVA DOS DEFEITOS. ....	5
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FERRO FUNDIDO.....	7
TABELA 3 - VALORES INDICADOS PELA FOSECO DA POROSIDADE E FLUXO DE METAL DO FILTRO PARA DIFERENTES TIPOS DE MATERIAL.....	20
TABELA 4 - GAMAS DE HUMIDADE, TEMPERATURA, BENTONITE ATIVA E PERMEABILIDADE DA AREIA VERDE E DADOS RELATIVOS A DATAS COM RESULTADOS OPOSTOS EM RELAÇÃO À PERCENTAGEM DE BOLHAS E METAL FRIO. ....	22
TABELA 5 – MÉTODO DE CÁLCULO DO TEMPO DE VAZAMENTO.....	24
TABELA 6 – DADOS RELATIVOS AO CÁLCULO DA $A_{SCSG}$ PELO MÉTODO DO TEMPO DE VAZAMENTO. ....	26
TABELA 7- RELAÇÃO DE GITAGEM TEÓRICA.....	26
TABELA 8 - RELAÇÃO DE GITAGEM CALCULADA A PARTIR DA MEDIÇÃO DO CACHO.....	27
TABELA 9 – RESUMO DAS ALTERAÇÕES EFETUADAS EM CADA ENSAIO. ....	43
TABELA 10 – GAMA DA VARIAÇÃO REAL DAS TEMPERATURAS DE VAZAMENTO. ....	47

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. FUNFRAP S.A. – GRUPO TEKSID**

A Funfrap é uma fundição localizada em Cacia no distrito de Aveiro e é especializada no desenvolvimento e produção de componentes para a indústria automóvel, em ferro fundido. É uma das 8 fundições do grupo italiano Teksid e a sua produção abrange os blocos de motor, cárteres chapéus, cambotas, caixas diferenciais, cárteres turbinas, turbo-coletores e coletores.

Possui certificação pelas normas ISO/TS 16949, NP EN ISO 14001, OHSAS 18001 e mais recentemente pela ISO 50001 relacionada com as melhores práticas em gestão de energia. Tem ainda em implementação a metodologia WCM (World Class Manufacturing) para uma melhoria contínua em todos os processos que assenta em 10 pilares: segurança, análise de custos, melhoria focalizada, atividades autónomas, manutenção preventiva, controlo da qualidade, gestão antecipada, gestão de competências das pessoas, e ambiente/energia.

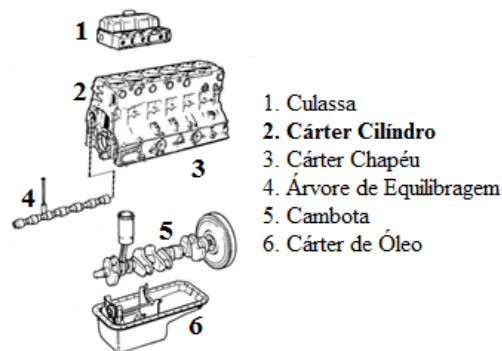
Os principais clientes são grandes marcas do ramo automóvel como FIAT, IVECO, GM, Renault, PSA, OMR, Chrysler, Honeywell.

Tem uma capacidade de produção de 45 000 toneladas por ano e toda a sua produção é para o mercado externo. Está dotada dos seguintes equipamentos principais:

- i. 4 Fornos elétricos com capacidade de 7,300kg cada;
- ii. Potência instalada de 4,500 kVA;
- iii. 1 Máquina de moldar Osborn: 1000 x 800 x (300 + 300) mm;
- iv. 1 Máquina de vazamento automático – Mezger;
- v. 10 Máquinas de machos - Dimensão máxima: 1220x850x(120x2) mm;
- vi. 18 Robots (Montagem e Pintura);
- vii. Raio-X;
- viii. 2 Máquinas CMM;
- ix. Sistemas de análise química com espectrómetros automáticos;
- x. Simulação Magmasoft®;
- xi. Modelação AutoCad, Unigraphics e Catia.

## 1.2. DESCRIÇÃO GENÉRICA DO CÁRTER CILINDRO

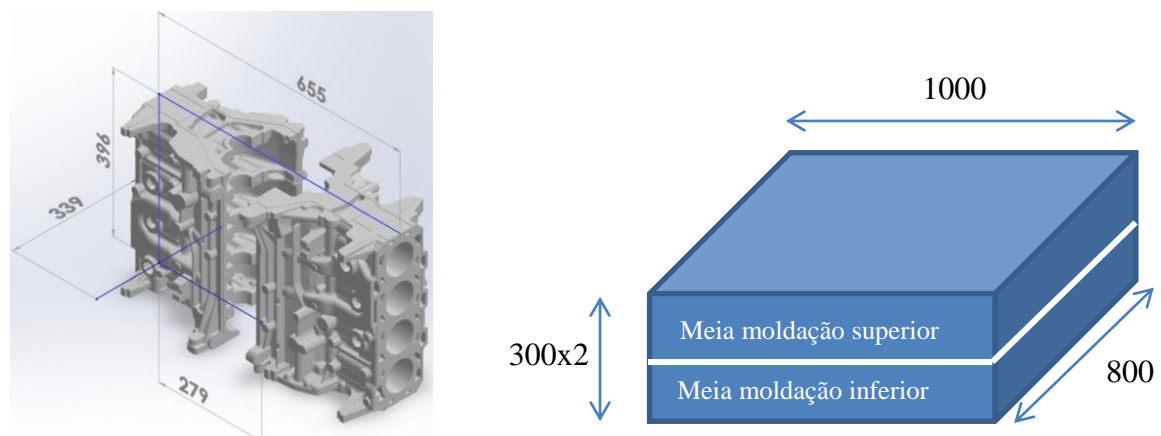
A peça em causa no trabalho é um cárter cilindro. A Figura 1 mostra um esquema de um cárter cilindro e os principais componentes dum bloco motor, onde este se insere. O princípio genérico de funcionamento de um bloco de motor está relacionado com o deslocamento dos pistões nos cilindros, que fazem rodar a cambota, à qual estão ligados, e esta, consequentemente produz a força mecânica para o movimento do veículo [1].



**Figura 1 - Esquema genérico de um bloco de motor. Adaptado de [2].**

## 1.3. DIMENSÕES DA PEÇA E DA CAIXA DE MOLDAÇÃO

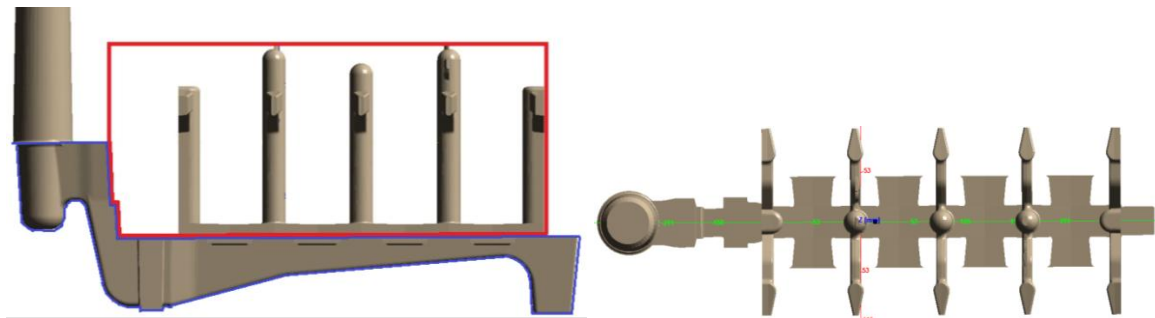
O peso do cacho é cerca de 148kg e as dimensões da peça e da caixa de moldação, em milímetros, são as indicadas na Figura 2. Cada moldação permite integrar dois modelos (peças).



**Figura 2- Dimensões das peças (esq.) e da caixa de moldação (dir.) em milímetros.**

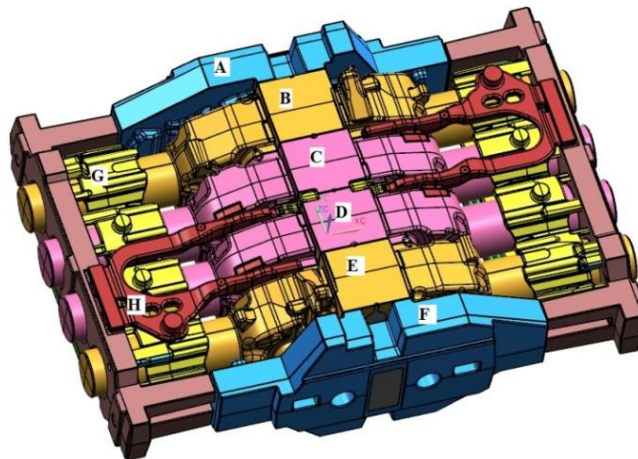
#### 1.4. SISTEMA DE GITAGEM

A Figura 3 mostra o desenho 3D do sistema de gitagem atual na vista em XX e em ZZ.



**Figura 3 – Vista em XX (esq.) e em ZZ (dir.) do sistema de gitagem atual.**

A zona assinalada a vermelho na Figura 3 é composta por um conjunto de 6 machos, representados na Figura 4 pelas letras A,B,C,D,E,F. Além dos machos cilindros, existem ainda os machos das camisas de água (com a letra G na Figura 4) e dos retornos de óleo (RO2 e RO3), sendo que o RO2 está representado na Figura 4 com a letra H.



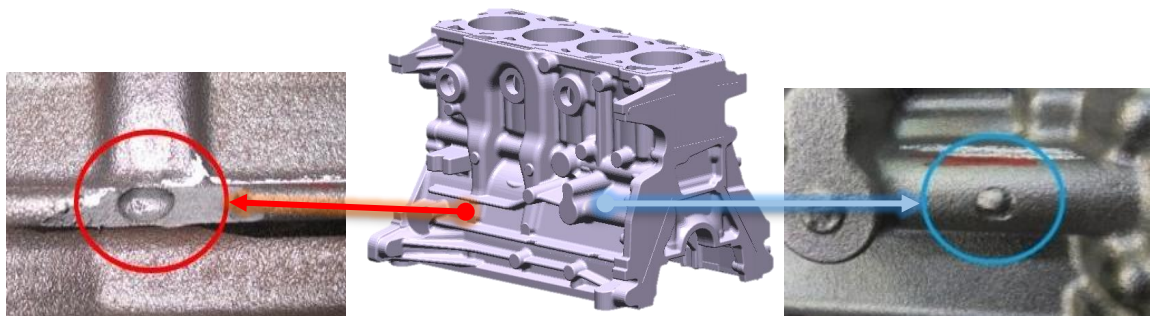
**Figura 4 – Desenho 3D do conjunto dos machos cilindros.**

A zona assinalada a azul na Figura 3 é realizada através da placa molde e é constituída por vários postigos de modo a facilitar possíveis alterações no sistema de gitagem.

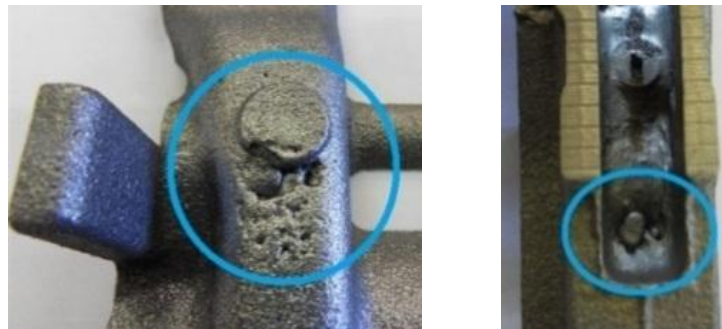
### 1.5. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS BOLHAS E METAL FRIO

Durante o ciclo de produção, as peças são sujeitas a um controlo visual a 100%. Este controlo é realizado no sector dos acabamentos onde as peças não conformes, que não possam ser recuperadas em linha, são assinaladas na zona em que o defeito ocorre, e são separadas. Nessas peças é feito o registo do tipo de defeito, a sua localização, a data e hora de vazamento, e o modelo da peça para posterior análise.

Através de uma análise da sucata é possível verificar as localizações mais críticas dos defeitos em estudo. Na Figura 5 encontram-se fotografias das duas localizações com a percentagem mais elevada de bolhas e na Figura 6 estão expostas duas fotografias na zona mais crítica de ocorrência de metal frio em que, para além deste defeito, aparece também formação de bolha.



**Figura 5- Localizações mais críticas de ocorrência de bolhas.**



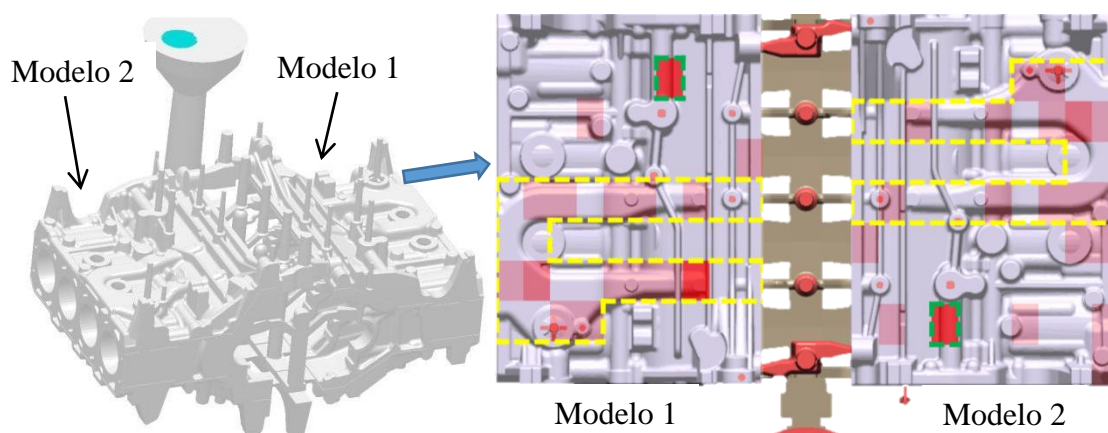
**Figura 6 - Aparecimento simultâneo de bolha e metal frio no retorno de óleo.**

Para detectar qual ou quais as zonas mais críticas em que cada defeito ocorre, foi feita uma recolha e análise de dados referente ao presente ano de 2013. Esta recolha permitiu criar um código de cores com as zonas mais críticas, apresentado na Tabela 1, e formar um mapa para cada defeito, representados pelas Figura 7 e Figura 8. Assim, é possível verificar as zonas mais críticas da peça. Na Figura 7 estão representados os dois modelos com o sistema de gitagem acoplado e na Figura 8 apenas uma representação de um modelo.

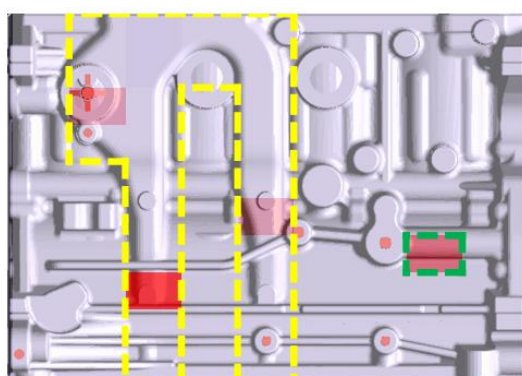


**Tabela 1 - Código de cores para a % relativa dos defeitos.**

Código de Cores			
% relativa dos defeitos	<10%	10%<x<20%	>20%



**Figura 7 – Esquema do sistema de gitagem e dos dois modelos (esq.) e a distribuição da percentagem relativa de bolhas por zona (dir.).**



**Figura 8 - Distribuição da percentagem relativa de metal frio por zona no modelo 1 e 2.**

Relativamente aos dois defeitos analisados, as zonas mais críticas são no designado retorno de óleo, a tracejado amarelo e localizado em cima do macho *RO2* (com a letra H na Figura 4), e a zona delimitada a verde designada “H7”. Pelas figuras, pode ver-se que essas zonas são coincidentes em relação aos defeitos, pelo que podem estar relacionados.

Uma análise geral dos defeitos indica que o aparecimento de bolhas corresponde a 16% da sucata total do ano 2013, e de metal frio corresponde a 11%, o que totaliza 27%.

Com as localizações mais críticas encontradas, o objectivo é verificar algumas causas mais importantes de aparecimento dos defeitos e realizar modificações que visem a sua redução.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. FERRO FUNDIDO LAMELAR

A microestrutura do ferro fundido cinzento é influenciada por diversos fatores, como por exemplo a composição química do banho, o estado de germinação da grafite e velocidade de arrefecimento. É um material com elevada vazabilidade, excelente maquinabilidade e baixo custo [4, 5, 6].

O ferro fundido lamelar é uma liga de ferro, carbono (2,5 a 4%) e silício (1 a 3%), que apresenta também quantidades residuais de fósforo, proveniente da sucata. Este, em percentagem elevada pode causar, além de porosidade, a formação de steadite, que é um fosfato de ferro, com baixo ponto de fusão e frágil, que é segregado nas fronteiras de grão e fragiliza fortemente o material. Por outro lado, em baixo teor pode causar penetração do metal na moldação. A maioria dos fundidos apresenta percentagens de 0,02 a 0,10% de fósforo [4, 5, 6].

Outro elemento importante também presente nos ferros cinzentos é o enxofre, que quando reage com elementos do grupo dos metais alcalinos e/ou alcalino terrosos, promove a formação de sulfuretos complexos que têm efeito na nucleação da grafite e deve apresentar valores entre os 0,05 a 0,12%. O enxofre deve ser balanceado com o manganês para promover a formação de sulfuretos de manganês de acordo com a Equação 1 de contrário promoverá a precipitação de FeS nas fronteiras de grão, nefasto para as propriedades do material, porque apresenta uma morfologia acicular [4, 7].

$$\%Mn \geq 1,7\%S + 0,3\%$$

**Equação 1**

Existem outros elementos que alteram a natureza e as propriedades dos materiais. São elementos que, dependendo dos requisitos em relação às propriedades, se adicionam intencionalmente, tal como o cromo, com teor <0,2%, ou o estanho (<0,15%) e o cobre (<0,3%) que promovem a perlite [4, 5].

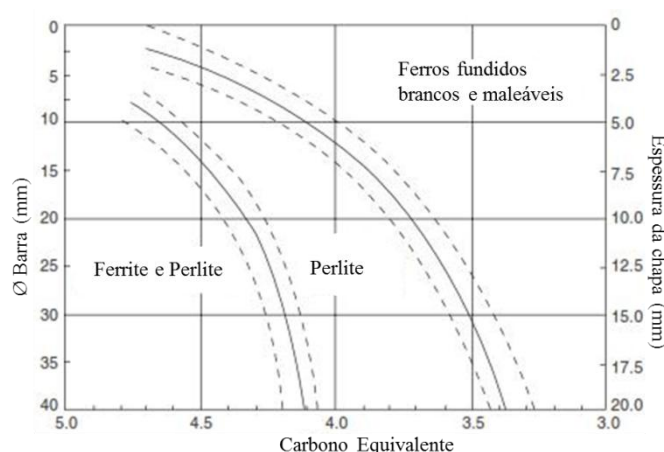
As normas relativas á liga utilizada pela Funfrap são a EN 1561 ou UNI ISO 185, e a classe do ferro é GJL 250, sendo o número correspondente à resistência à tração em MPa. A composição química está apresentada na Tabela 2 [8].



**Tabela 2 - Composição química da liga.**

	Carbono	Silício	Crómio	Enxofre	Fósforo
Percentagem (%)	3.2 – 3.5	2.0 – 2.5	≤0.2	≤0.15	≤0.10

A uma grande percentagem de ferros fundidos cinzentos é requerida boa resistência à tração e ao mesmo tempo boa maquinabilidade, o que pode ser alcançado com uma estrutura perlítica (Figura 9). Um valor elevado de dureza diminui a maquinabilidade pelo que será de evitar carbonetos livres [9].



**Figura 9 - Relação entre o carbono equivalente, a espessura de secção e a estrutura.**

O carbono equivalente, representado na figura anterior, é dado pela percentagem de carbono, de silício e de fósforo, e pode ser descrito pela Equação 2:

$$CE = \%C + \frac{(\%Si + \%P)}{3} \quad \text{Equação 2}$$

Um ferro fundido cinzento com um valor do carbono equivalente de 4, para manter uma estrutura perlítica, deveria ter um diâmetro maior do que 12mm para o caso de ser uma barra, ou uma espessura maior do que 6mm no caso de ser uma chapa [9].

## 2.2. PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE

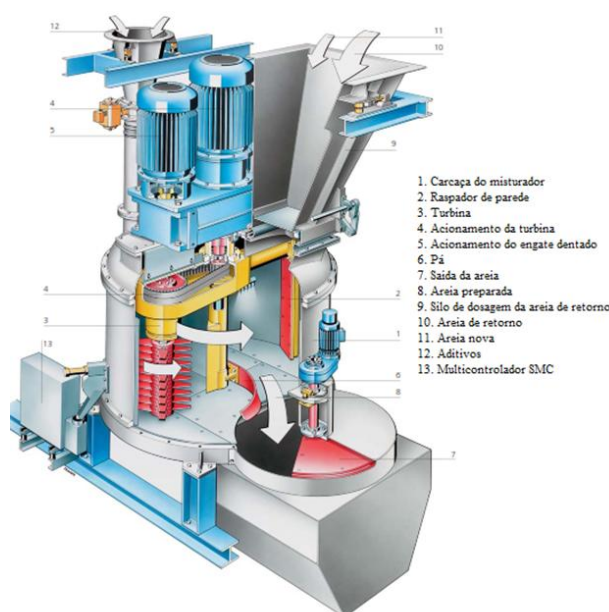
### 2.2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA AREIA

A areia sintética de sílica é o tipo de areia mais usado na fundição e é, como o próprio nome indica, constituída essencialmente por sílica, podendo haver em muito pequenas quantidades feldspato, mica e outros minerais associados aos seus grãos. É usada para

vazamento de ligas metálicas até 1600°C, muito devido à sua elevada refratariedade, que permite uma extensa gama de aplicações, considerando o seu reduzido custo, a sua elevada condutividade térmica e à sua expansão térmica (cerca de 1,4% no máximo). O seu índice de finura (AFS) tem uma gama muito alargada de valores que pode ir desde os 27 até aos 180 [4, 5, 9].

### 2.2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Numa galga, como a representada na Figura 10, são misturados os constituintes básicos do processo que são a areia nova e recuperada, a água, o ligante (geralmente bentonite) e os aditivos (por exemplo pó de carvão).



**Figura 10 - Esquema de uma galga [11].**

A bentonite e a água formam o argilóide que é uma pasta plástica pegajosa e aderente que reveste os grãos de areia [4, 6].

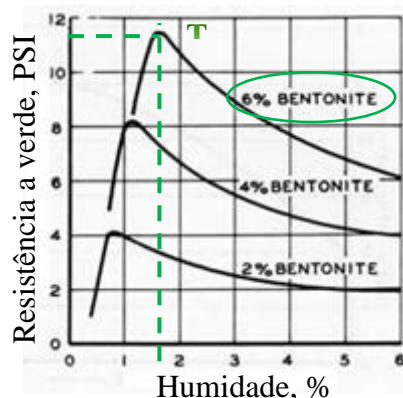
Aquando a passagem do metal líquido pela moldação, há a formação de gás, proveniente da decomposição térmica do ligante, dos aditivos e de possíveis contaminantes. Se a permeabilidade não for suficiente para permitir a saída dos gases, a pressão dentro da cavidade aumenta, impedindo assim o fluxo de metal. Deste modo, é necessário manter um balanço entre a permeabilidade e a formação dos gases [7].

Os aditivos (por exemplo pó-de-carvão) são substâncias geralmente combustíveis que em contacto com o metal líquido combustam e geram uma atmosfera redutora que diminui a interação do metal com a moldação, sendo os gases libertados pelos respiros das moldações.

A água destina-se, maioritariamente, à formação do argilóide mas também está presente no invólucro oolítico, pó de carvão e nos poros da areia. No sentido de obter uma boa adesão, a água e a argila devem ter uma relação mais aproximada possível do ponto de têmpera em que abaixo deste a mistura é frágil e acima é plástica (Figura 11) [4].

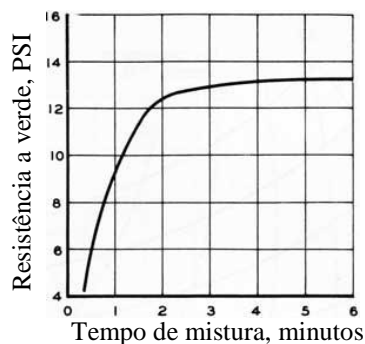
O teor de humidade é muito importante no processo e depende maioritariamente do tipo de argila, da porosidade inicial da areia, da quantidade de invólucro oolítico resultante da desativação da bentonite, e do teor de pó-de-carvão.

A relação entre a resistência à compressão em verde e o teor de humidade na areia, dependente do teor de bentonite, está apresentado na Figura 11. O ponto máximo das curvas é o ponto de têmpera, representado com a letra “T” na Figura 11, para uma mistura com 6% de bentonite. Para a esquerda do ponto de têmpera, como referido, a areia é frágil e é susceptível a defeitos, por exemplo fissuras e erosão, pelo que se deve manter sempre o teor de humidade superior ao do ponto de têmpera [10].



**Figura 11 - Gráfico da relação entre a resistência à compressão a verde e o teor de humidade, variando o teor de bentonite. Adaptado de [12].**

A eficiência da galga é extremamente importante e é necessário obter um correto balanço entre a quantidade de material que entra e que sai da galga a cada momento [13].



**Figura 12 – Curva da resistência à compressão a verde com o tempo de mistura. Adaptado de [12].**

Segundo a curva, para obter um valor de resistência à compressão a verde máximo, é necessário um tempo de mistura perto dos 2 minutos, depois dos quais o valor de resistência se mantém praticamente constante.

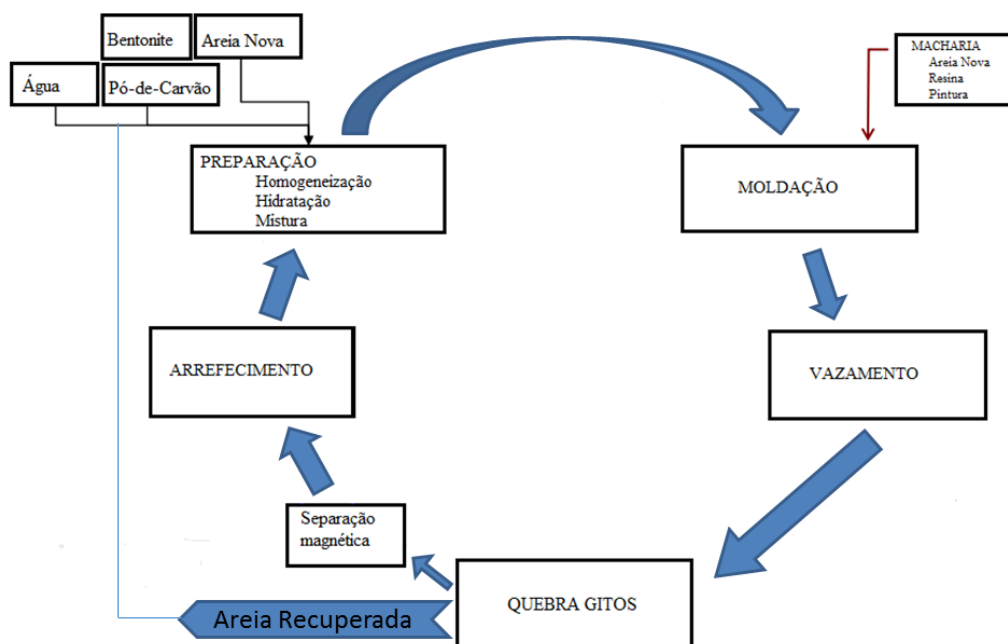
### **2.2.3. PREPARAÇÃO DA AREIA**

Os objetivos da preparação da areia são a obtenção duma boa homogeneização da mistura dos grãos com o argilóide, e assegurar um teor de humidade adequado para manter a compactabilidade.

Este processo é efetuado numa galga, como por exemplo a da Figura 10, que aplica uma força de compressão à areia para, assim, revesti-la com o argilóide [4].

### **2.2.4. PREPARAÇÃO DA MISTURA**

Para a preparação da mistura utiliza-se um sistema de controlo automático da humidade em contínuo, antes de chegar à galga. Há uma medição da humidade e uma posterior correção automática para o valor alvo que deve ser adicionado. Quanto à temperatura que a areia deve chegar à galga, deverá ser o menor possível para evitar a sua secagem durante as etapas seguintes, pelo que se utilizam jatos de ar comprimido para o seu arrefecimento [4]. Na Figura 13 é apresentado um fluxograma do ciclo da areia verde com algumas das principais etapas.



**Figura 13 - Fluxograma do ciclo da areia verde. Adaptado de [27].**

Na fase da preparação juntam-se a água, bentonite, pó de carvão, areia nova e areia recuperada e mistura-se na galga. Depois deste processo, a mistura entra na máquina de moldar, onde são feitas as duas meias moldações.

Posteriormente, são colocados os machos na moldação e depois da união das duas meias moldações, estas vão para a fusão onde vai ser vazado o metal líquido.

Após o arrefecimento das moldações, estas passam pelo quebra-gitos, onde o cacho é separado da areia. Esta areia é separada e recuperada, voltando ao circuito, enquanto a que sai durante o processo de separação dos modelos no quebra-gitos vai ser sujeita a uma separação magnética para separar o metal, e arrefecida, voltando novamente para a preparação.

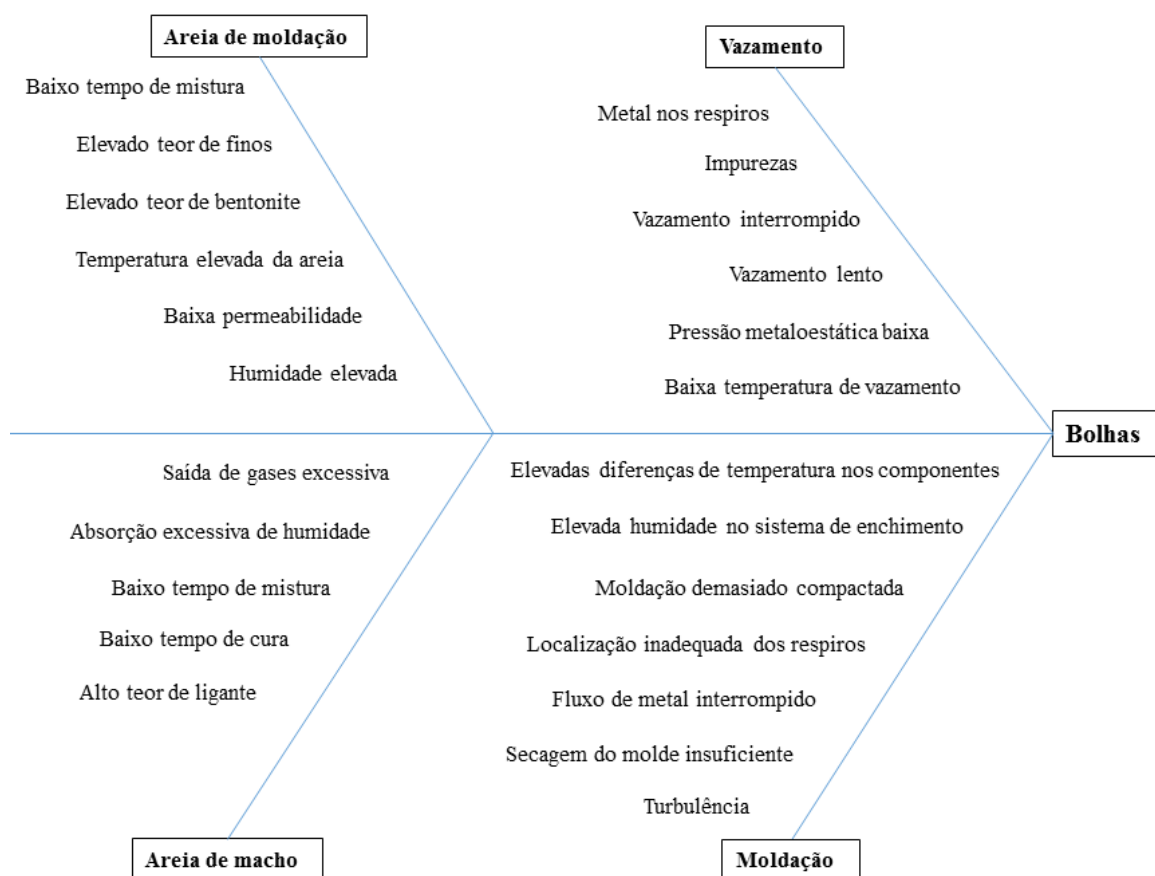
### 2.3. BOLHAS

As bolhas apresentam-se à superfície das peças como se pode ver na Figura 14 devido aos gases que ficam aprisionados, e cuja elevada pressão os direciona para onde há menos resistência à sua passagem, evitando um enchimento correto desta, e são descritas como cavidades com uma forma esférica e lisa.



**Figura 14 - Formação de bolhas à superfície de um radiador em ferro fundido cinzento [15].**

Na Figura 15 é apresentado um diagrama de Ishikawa para uma melhor percepção das causas que podem levar à ocorrência de bolhas nos fundidos.



**Figura 15 - Diagrama de Ishikawa para a formação de bolhas nos fundidos.**

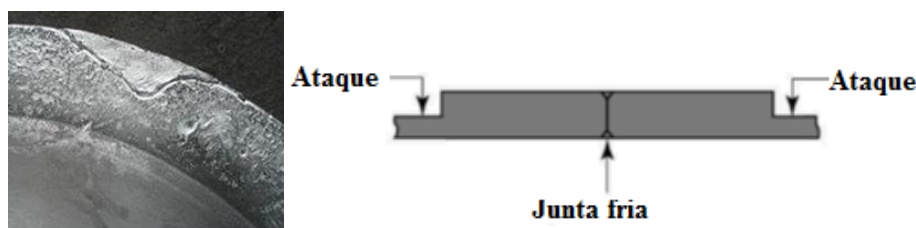
O aparecimento deste defeito é, na sua grande maioria, na moldação superior. Para o evitar deve proceder-se a modificações que reduzam a quantidade de gás formado e/ou a pressão deste na moldação, como por exemplo retirar agulhas. O seu grau de preparação e teor

de humidade da areia verde, bem como a sua distribuição tornam-se, portanto, fatores extremamente importantes no que diz respeito à formação quer de bolhas, quer dos defeitos referidos neste trabalho. Também a permeabilidade tem influência neste defeito e pode ser afetada por excesso de finos ou uma distribuição granulométrica não uniforme. O tempo de mistura da areia e a eficiência da mistura devem ser tomados em consideração visto que um tempo insuficiente e uma má eficiência da mistura podem causar áreas com elevada concentração de gás. Os respiros devem ser em número e em tamanho adequado para libertar os gases formados e não permitir a entrada de metal nestes.

A reação entre o banho metálico e o macho liberta gases que são removidos preferencialmente através dos prensos. A formação destes gases é proporcional à quantidade de ligante, portanto é recomendável a sua diminuição. Uma correta secagem dos machos pode prevenir este defeito. O uso de machos frios em moldações com areia quente, ou mesmo aquando o seu armazenamento, pode levar à adsorção da água por parte da tinta do macho colocado na moldação e pode resultar na vaporização explosiva da água e todos os defeitos associados. O problema da vaporização da água pode ser contrariado através da redução do caudal e da turbulência que o fluxo de metal provoca no contato com as paredes da moldação [14, 15, 17, 19].

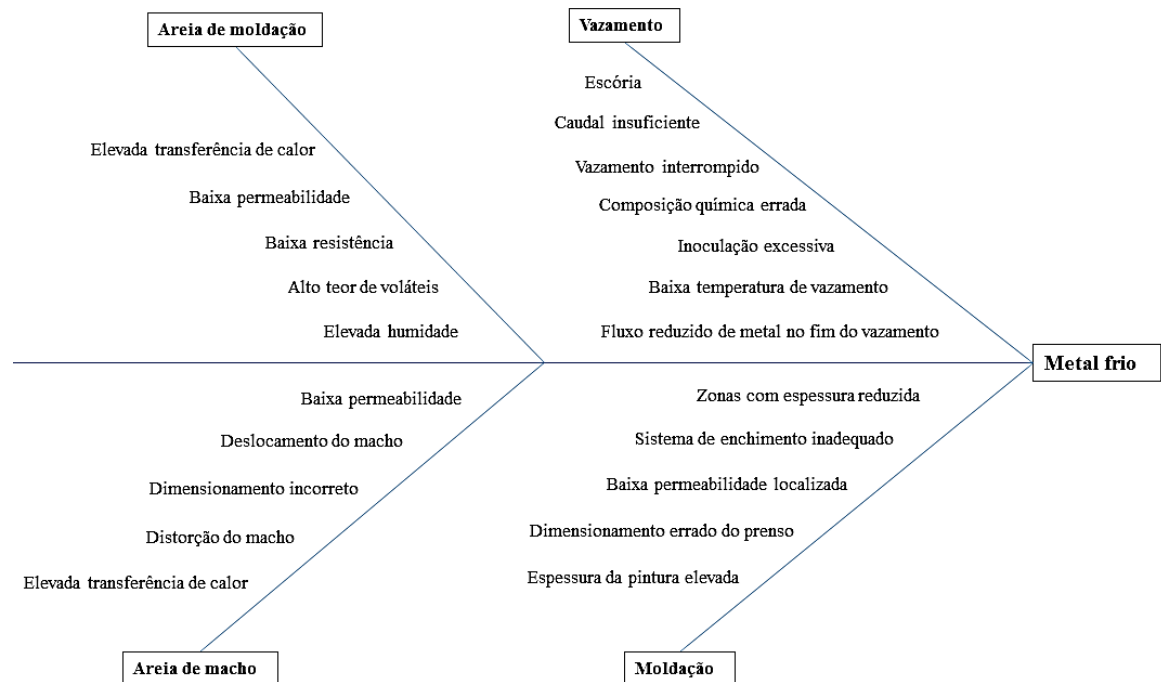
## 2.4. METAL FRIO

Este defeito é caracterizado por uma descontinuidade, onde dois fluxos de metal convergem, que toma o aspeto de uma fissura (Figura 16).



**Figura 16 - Exemplo (esq.) e esquema (dir.) da formação de metal frio.**

As principais causas associadas estão referenciadas no seguinte diagrama de causa-efeito da Figura 17.



**Figura 17 - Diagrama de Ishikawa para a formação de metal frio nos fundidos.**

Este é um defeito comum em fundição e pode originar um produto não-conforme com todas as consequências associadas. Deve ter-se em consideração no projeto, tudo aquilo que possa originar uma interrupção no fluxo do banho metálico. No estudo do sistema de enchimento, apesar de algumas zonas serem de espessura reduzida e impossibilitarem um correto *design*, é fundamental e mais barato tentar contrariar este efeito nesta fase. Quando tal é impossível, devem tomar-se medidas no sentido de aumentar a fluidez, como por exemplo aumentar a temperatura de vazamento.

No estudo do sistema de enchimento é importante o correto dimensionamento e localização do gito de descida, canais de distribuição e ataques, para manter um fluxo de metal constante e ininterrupto, evitando assim este defeito mas também porosidade ou rechupes.

A areia de moldação e de macho devem ter o mínimo possível de humidade e de materiais geradores de voláteis, visto poderem provocar a diminuição de fluidez através da pressão dos gases na moldação, o que impede o correto fluxo do metal. Se a permeabilidade da areia for baixa, agrava o defeito visto os gases ficarem mais facilmente presos na cavidade. Uma espessura da pintura elevada, quer em zonas específicas da moldação quer no macho, assim como distorções ou incoerência no dimensionamento pode também originar metal frio.



Aquando o vazamento pode entrar escória no fluxo de metal líquido e reduzir o caudal através do bloqueio do filtro ou dos canais devendo ser evitado. Além disso, e também muito importante, é conseguir obter um vazamento com um caudal adequado, a velocidade constante, e contínuo assegurando assim a pressão e o tempo necessário para que o metal preencha todas as zonas da cavidade [13, 16, 18]

## 2.5. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS - LÍQUIDOS PENETRANTES

Ao contrário das bolhas, que são perfeitamente visíveis, a junta fria existente no interior do retorno de óleo (designado *RO2*) é, na maioria das vezes, difícil de detectar devido à sua localização de difícil acesso. O controlo do interior da peça é feito com uma lanterna. Quando ficam dúvidas de uma possível fuga nessa zona, é realizado um ensaio por líquidos penetrantes, que não danifica a peça e dá resultados quase imediatos.

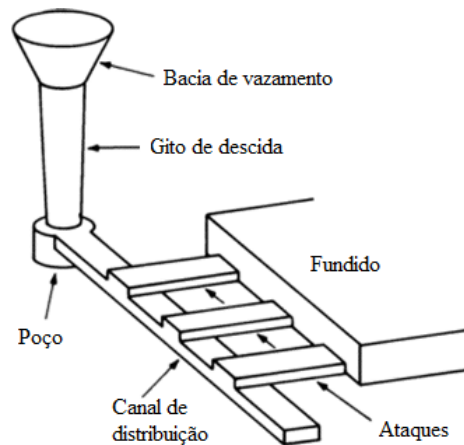
Este ensaio é feito através da utilização de um líquido corante (a vermelho na Figura 18), que, após a sua colocação na face oposta e por efeito de capilaridade, é absorvido pelas falhas do material e é revelado pelo designado “revelador” (a branco na Figura 18) [21].



**Figura 18 – Ensaio de líquidos penetrantes na zona do *RO2*.**

## 2.6. SISTEMA DE GITAGEM

O sistema de gitagem pode ser descrito como um sistema que conduz e controla adequadamente o fluxo de metal líquido até à cavidade de moldação, enchendo-a e preenchendo todos os detalhes que possam existir no fundido, alimenta o fundido enquanto este solidifica, e controla a transferência de calor e a taxa de solidificação em regiões críticas. Este sistema especifica o tamanho, dimensões e a localização do gito de descida, poço, canais, ataques e possíveis alimentadores que o compõem. No esquema da Figura 19 estão representados os componentes básicos dum sistema de gitagem simples [22, 23].



**Figura 19 – Componentes básicos dum sistema de gitagem simples para moldação horizontal. Adaptado de [22].**

O objetivo do sistema de gitagem é:

- Promover um enchimento suave, não turbulento, para facilitar a retenção da escória na bacia de vazamento e evitar que o metal reaja excessivamente com a atmosfera ou com a moldação;
- Garantir uma distribuição de temperaturas adequada durante a solidificação e arrefecimento;
- Distribuir metal fundido a todas as partes da cavidade de moldação [22, 23].

## 2.7. RELAÇÃO DE GITAGEM

A relação de gitagem é dada por  $S_{\text{gito}} : S_{\text{canal}} : S_{\text{ataque}}$  onde o “S” significa área da seção transversal. Se houver múltiplos canais ou ataques, a sua área total deve ser considerada.

Um sistema divergente, em que a área dos ataques é maior do que a área do gito de descida é preferido ao sistema convergente porque assegura que o metal diminui a velocidade ao longo do vazamento, reduzindo possíveis problemas de turbulência. Exemplos de relações de gitagem: 1:2:1,5 para metais ferrosos e 1:4:4 para não ferrosos. Pode ser usado também um valor mais elevado na área dos ataques de modo a reduzir a velocidade do metal líquido nestes, e assim evitar a aspiração de ar [24].

## 2.8. DINÂMICA DE FLUÍDOS

Para cumprir os objetivos do sistema de gitagem e produzir fundidos com a qualidade que o cliente especifica, é necessário o devido entendimento de alguns princípios básicos do fluxo de um líquido incompressível como a Lei da Continuidade, a Lei de Bernoulli e a Lei de Torricelli.

### 2.8.1. LEI DA CONTINUIDADE

A lei da continuidade refere que ao longo de uma linha de fluxo de um fluído, a massa é conservada de modo que:

$$Q = A.v = \text{constante} \quad \text{Equação 3}$$

Onde Q é o caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), A é a área de secção transversal num determinado ponto ( $\text{m}^2$ ) e v é a velocidade do fluido nesse mesmo ponto ( $\text{m/s}$ ) [25].

### 2.8.2. LEI DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (EQUAÇÃO DE BERNOULLI)

A equação de Bernoulli é derivada do teorema trabalho-energia, em que refere que o trabalho realizado por todas as forças do sistema é igual à variação da energia cinética, e pode ser escrita como na Equação 4:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad \text{Equação 4}$$

A pressão é dada por P, a densidade por  $\rho$ , a velocidade por v, a aceleração da gravidade por g, e a altura por h.

### 2.8.3. LEI DE TORRICELLI

A lei de Torricelli é um desenvolvimento da equação de Bernoulli em ordem à velocidade, com algumas considerações, e é descrita da seguinte forma:

$$V = C_v \sqrt{2gh} \quad \text{Equação 5}$$

Na Equação 5,  $v$  representa a velocidade, e  $C_v$  é o coeficiente de perda de velocidade por atrito, que é dado pela razão entre a velocidade média real e a velocidade média ideal (sem atrito).

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O projeto começou com a ambientação à empresa, e o seguimento do ciclo de produção da peça em estudo. Este acompanhamento do ciclo de produção permitiu-me ter uma noção mais realista, e um conhecimento mais aprofundado, da indústria de fundição.

A estratégia elaborada para a resolução ou melhoramento do problema das bolhas e junta fria no 650 foi a seguinte:

1. Caracterizar os defeitos através da análise de sucata.
2. Verificar se o sistema de gitagem está corretamente elaborado, em termos de localização dos diversos componentes e as suas dimensões, ou se haveria possibilidade de melhorias.
3. A partir dos diagramas de Ishikawa escolher algumas das causas consideradas mais relevantes e verificar se cada uma delas se encontra dentro dos parâmetros.
4. Fazer uma simulação inicial do sistema atual com os parâmetros aproximados aos que se obtêm na realidade.
5. Simular no *MagmaSoft* as alterações sugeridas de modo a ter uma simulação final com o conjunto de alterações que melhores resultados obtiveram, para validar experimentalmente.
6. Validar experimentalmente a simulação com melhores resultados.
7. Acompanhar o ensaio experimental de modo a verificar se todas as alterações efetuadas cumprem o estipulado.
8. Fazer uma análise global dos ensaios e comparar com as datas anteriores, correspondentes ao presente ano de 2013.

### **3.1. ANÁLISE DE SUCATA**

Através de várias análises da sucata, foi possível visualizar os defeitos em causa e as suas localizações, assim como outros defeitos que aparecem esporadicamente.

A partir dos registos existentes na empresa, foi possível efetuar um mapa de cores que evidencia as zonas da peça em que os defeitos em causa são mais críticos.

### **3.2. AREIA**

A partir dos diagramas de Ishikawa dos defeitos, escolheram-se as possíveis causas dos defeitos relativamente à areia e analisaram-se os parâmetros considerados mais importantes em datas com resultados opostos em termos de percentagem de sucata desses defeitos. Os parâmetros escolhidos foram a humidade, a temperatura da areia, a argila ativa e a permeabilidade. Estes parâmetros são fundamentais para evitar uma das causas possíveis para o aparecimento dos defeitos em causa que é a má resistência da areia.

### **3.3. VAZAMENTO**

De modo a verificar uma possível influência do vazamento nos defeitos, foram verificados os parâmetros da temperatura, tempo de vazamento, e também diversas situações que pudessem perturbar o correto vazamento, como arrancamento de areia nas costas da moldação, os vazamentos interrompidos, o caudal, e o fluxo reduzido no fim do vazamento.

### **3.4. GITAGEM**

Através do *software SolidCast 8.0* foi possível simular a peça em vazio de modo a obter as zonas que solidificam em último lugar - pontos quentes – e assim verificar se a peça tem os ataques bem distribuídos.

Foi calculada a área da secção característica do sistema de gitagem, assim como as dimensões teóricas de todos os elementos que compõem o sistema de gitagem. Foi também medido o cacho com um paquímetro e posteriormente feita uma medição através do desenho 2D do sistema de gitagem para verificar qual a relação de gitagem e assim poder comparar à teórica.

### 3.5. FILTRAGEM

Na Tabela 3 é apresentado o valor recomendado pela Foseco da porosidade do filtro (em PPI) em conjunto com a taxa de fluxo de metal que é permitida pelo mesmo [3].

**Tabela 3 - Valores indicados pela Foseco da porosidade e fluxo de metal do filtro para diferentes tipos de material.**

Tipo de Liga	Porosidade do filtro (PPI)	Fluxo de metal no filtro (kg/cm <sup>2</sup> )
Ferro Cinzento	20	2 - 4
Ferro dúctil	10	1 - 2
Aço ao carbono	10	1 - 1.2
Liga de aço	10	1.5
Niresist	10	0.8 - 1

De acordo com a Equação 6 é possível estimar a área do filtro necessária para o vazamento de uma determinada quantidade de metal. Para o ferro cinzento, e considerando o limite máximo de fluxo de metal no filtro indicado pela Foseco temos que:

$$\text{Área do filtro (cm}^2\text{)} = \frac{\text{Quantidade de metal (kg)}}{\text{Fluxo de metal no filtro (}\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\text{)}} \quad \text{Equação 6}$$

A área do filtro para uma quantidade de metal de cerca de 148kg e um fluxo máximo de 4kg/cm<sup>2</sup> é de 3700mm<sup>2</sup>. Fez-se uma comparação entre este valor e o valor real.

### 3.6. MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO

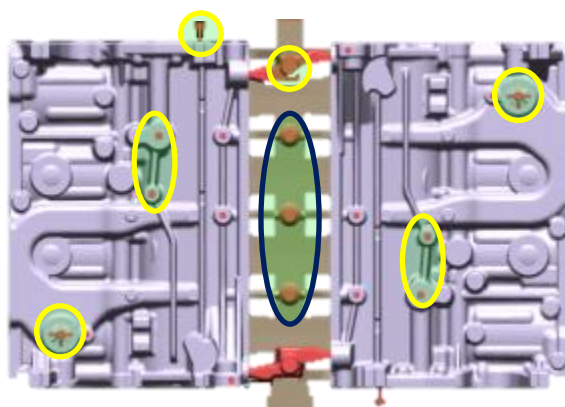
Para a concretização das alterações referidas no trabalho, e posterior simulação, foram utilizados dois *softwares* distintos. O *Unigraphics 7.5*, *software* CAD de modelação 3D que permitiu efetuar alterações na geometria do sistema de enchimento, e o *MagmaSoft 5.2* para as simulações de enchimento das alterações efetuadas. Todas as simulações e alterações realizadas nestes *softwares* foram efetuadas pelo Eng.º Pedro Rocha e pelo Sr. Luís Saraiva, respectivamente.

Foi feita uma simulação inicial com a peça e o sistema de enchimento original para validar a presença dos defeitos nas zonas mais críticas, de acordo com a análise inicial dos registos. Alguns parâmetros pré-definidos no *software* foram alterados. Para a temperatura da areia foi utilizado um valor médio mensal (38,4°C) e para o fluxo de entrada de metal,

calculou-se a partir da densidade do metal, do tempo de vazamento alvo e do peso do cacho ( $1465\text{cm}^3/\text{s}$ ).

Além destes parâmetros foi possível ter em conta as agulhas que existem atualmente, ou seja, a ligação dos respiros ao exterior da moldação. Na Figura 20 estão representados:

- A vermelho, os respiros;
- A amarelo, as zonas das agulhas com 6mm de diâmetro. Estas agulhas são feitas através duma placa de agulhas que desce, vibra e perfura a meia moldação superior que se encontra com as costas voltadas para baixo;
- A azul são os locais onde os respiros são ligados ao exterior através da furação pelas costas da moldação com uma broca de 18mm.



**Figura 20 – Localização dos respiros e agulhas na placa molde superior.**

Através dos critérios *Air Entrapment* (aprisionamento de gás) e temperatura, é pretendido verificar a probabilidade de ocorrência de bolhas e metal frio, respectivamente, no fundido. O *Fill Tracer* é outro critério útil e importante do *MagmaSoft* e permite verificar o fluxo do metal pelo sistema. O critério da velocidade é também importante, e mostra, além da velocidade do metal em todas as zonas do sistema, as zonas onde há estrangulamentos.

O critério *Air Entrapment* calcula a concentração de gás que fica aprisionada no metal líquido devido ao colapso das cavidades de ar. A quantidade de gás que é aprisionado é representada por um valor em percentagem. Os valores mais elevados representam os locais em que é mais provável haver aprisionamento de gás e consequentemente a possível formação de bolhas [26].

O *Fill Tracer* é um critério que consiste numa adição de partículas ao inlet (volume com uma área superficial correspondente à largura do jato de metal líquido ao entrar na bacia de vazamento) de modo a gravar os seus percursos durante o enchimento. Isto permite visualizar o percurso, através do tempo, e possíveis zonas com turbulência [26].

Com base na análise dos critérios presentes no *software*, e com a comparação entre o sistema de gitagem real e o teórico, esperam-se obter resultados que permitam perceber possíveis causas do aparecimento destes defeitos de modo a reduzi-los ou eliminá-los.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. PARÂMETROS DA AREIA

Foi feita uma recolha de dados em relação à areia verde, em que se escolheram datas de vazamento do ano 2013 com bons resultados em relação à percentagem de bolhas e metal frio (datas A, B e C) e datas em que os resultados não foram tão bons (datas D e E). Por motivos de confidencialidade não podem ser revelados os valores dos parâmetros da areia, de modo que os resultados na Tabela 4 são apresentados na forma de polegares verdes caso o parâmetro esteja dentro da gama, e com polegares vermelhos no caso contrário.

**Tabela 4 - Gamas de humidade, temperatura, bentonite ativa e permeabilidade da areia verde e dados relativos a datas com resultados opostos em relação à percentagem de bolhas e metal frio.**

	Humidade (%)		Temperatura (°C)	Bentonite (%)		Permeabilidade
	Min	Máx		Min	Máx	
<b>Gama</b>	2,2	2,6	≤ 45	5,6	6,8	≥ 130
<b>Data A</b>	👍		👍		👍	👍
<b>Data B</b>	👍		👍	👎		👍
<b>Data C</b>	👍		👍	👍		👍
<b>Data D</b>	👍		👍	👎		👍
<b>Data E</b>	👍		👍	👍		👍

É possível verificar que, tanto nas datas A, B e C como nas datas D e E, existem valores de percentagem de bentonite fora da gama, nos dois casos, inferiores a 5,6%.

Como se pode verificar, através da Figura 11, se o teor de humidade se mantiver, e o valor da bentonite baixar, a resistência da areia vai diminuir, o que pode provocar arrancamento de areia nas costas da meia moldação superior ao ser colocada a placa de agulhas.



Por outro lado, se a resistência se mantivesse igual, mesmo com uma percentagem de bentonite abaixo da gama, um maior número de agulhas enfraquece mais a moldação e pode provocar também arrancamentos.

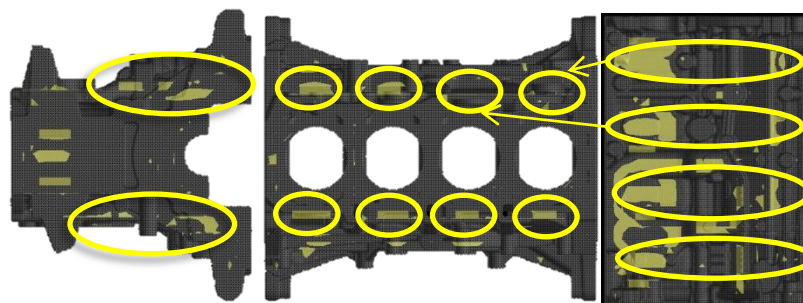
O tempo de mistura é importante para o processo, mas não há registos internos devido ao misturador ser contínuo. Uma maior necessidade de areia na data D fez aumentar a velocidade do tapete que leva a areia ao misturador e provocou uma diminuição do tempo de mistura. Isto causa uma diminuição da resistência da areia, e pode provocar arrancamentos na moldação.

Estes arrancamentos, dependendo da sua extensão, aumentam (entre outras) a probabilidade de ocorrência de bolhas. Quando o metal sai da bacia de vazamento pode ocupar o sítio do arrancamento, que se situa mais perto da superfície da peça, aprisionando o gás que está a sair durante o vazamento, ficando assim entre o metal que está a chegar ao topo da moldação e o que transvazou para a zona do arrancamento.

## 4.2. GITAGEM

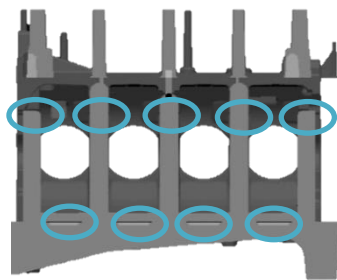
### 4.2.1. PONTOS QUENTES

Na Figura 21 encontram-se assinalados a amarelo os pontos quentes numa simulação em vazio da peça através do *software* de simulação 3D, *SolidCast*. O sistema de gitagem é projetado tendo em conta estas localizações. Este *software* foi escolhido em detrimento do *MagmaSoft*, para este efeito, devido a ser o *software* utilizado durante o curso, e por não ser dependente da disponibilidade do Eng.º Pedro Rocha.



**Figura 21 - Pontos quentes na simulação em vazio da peça em *SolidCast*. Da esquerda para a direita são as vistas em YY, em XX e em ZZ.**

A Figura 22 pretende mostrar a localização dos ataques existentes no sistema atual através de um corte a meio do sistema de gitagem na vista em XX.



**Figura 22 - Localização dos ataques no sistema de gitagem atual.**

As zonas assinaladas a amarelo na Figura 21, correspondentes aos pontos quentes, são as zonas onde se deveriam localizar os ataques na peça. Estas zonas coincidem com as zonas assinaladas a azul, não havendo por isso, intenção de modificar as localizações dos ataques no sistema.

#### 4.2.2. ÁREA DA SECÇÃO CARACTERÍSTICA ( $A_{scsg}$ )

Pelo método AFS, é possível estimar o tempo de vazamento (Tabela 5) e o coeficiente de perdas de velocidade por atrito (Figura 23) de modo a calcular a  $A_{scsg}$  pelo método do tempo de vazamento [23].

**Tabela 5 – Método de cálculo do tempo de vazamento.**

Tempo de vazamento	$K_f * (1,41 + (\text{espessura mínima} / 14,59)) * \sqrt{\text{Peso}}$
$K_f$	Fluidez (mm) / 40
Fluidez	$14,9 * CF + 0,05T - 155$
CF	$\%C + 0,25*\%Si + 0,5*\%P$

O coeficiente de atrito, pelo método AFS, é lido no gráfico da Figura 23. Para a sua obtenção é necessário calcular  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  através da equação 7, 8, 9 e 10, e de seguida somá-los e ler o valor correspondente no gráfico [23].

$$C_1 = 0,1 \times \left( \frac{A}{A_1} \right)^2 + 0,02 \times \frac{l}{d} \times \left( \frac{A}{A_1} \right)^2 \quad \text{Equação 7}$$

$$C_2 = 2 \times \left( \frac{A}{A_2} \right)^2 + 0,04 \times \frac{L_r}{a} \times \left( \frac{A}{A_2} \right)^2$$

**Equação 8**

$$C_3 = 2 \times n \times \left( \frac{A}{A_3} \right)^2$$

**Equação 9**

$$C_4 = 0,07 \times \frac{b+c}{2 \times b \times c} \times L \times \left( \frac{A}{A_3} \right)^2$$

**Equação 10**

A - área da base do gito de descida

A<sub>1</sub> - área do topo do gito de descida

A<sub>2</sub> - área total dos canais de distribuição

A<sub>3</sub> - área dos ataques

l - altura do gito de descida

d - diâmetro médio do gito de descida

l<sub>r</sub> - comprimento do canal de distribuição

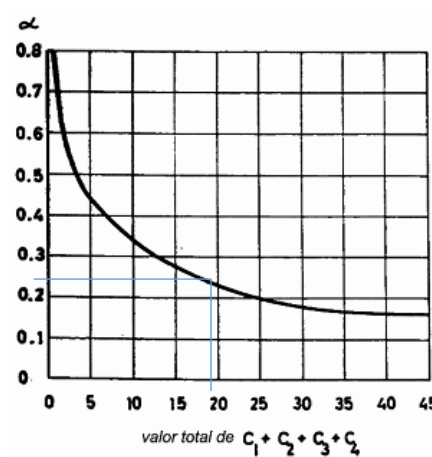
a - comprimento da aresta da secção do canal

n - número de ataques

b - largura de cada ataque

c - espessura do ataque

L - comprimento total de todos os ataques.



**Figura 23 - Coeficiente de atrito.**

A soma dos coeficientes é de 19, e o valor lido do coeficiente de atrito é de 0,24.

Os valores relativos ao cálculo da  $A_{scsg}$  encontram-se na Tabela 6, e esta pode ser calculada através da Equação 11 pelo método do tempo de enchimento:

$$S_m = \frac{P}{\rho C_m \sqrt{2gH_m}} \times \frac{1}{t} \quad \text{Equação 11}$$

**Tabela 6 – Dados relativos ao cálculo da  $A_{scsg}$  pelo método do tempo de vazamento.**

$S_m = A_{scsg}$	<b>2390</b>	mm <sup>2</sup>
Peso do cacho (P)	148	Kg
Densidade ( $\rho$ )	7,2	g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de atrito ( $C_m$ )	0,24	
Aceleração da gravidade (g)	9,8	m/s <sup>2</sup>
Altura da queda do metal ( $H_m$ )	200	mm
Tempo de vazamento (t)	18	s

O tempo de vazamento teórico corresponde ao valor máximo da gama praticado na empresa, o que sugere um vazamento mais rápido em relação ao calculado.

Através da  $A_{scsg}$  obtém-se o diâmetro da mesma, que corresponde a 55,1mm, e se assemelha ao valor real do diâmetro do topo do gito de descida (55mm).

### 4.2.3. RELAÇÃO DE GITAGEM

#### 4.2.3.1. RELAÇÃO DE GITAGEM TEÓRICA

A partir do cálculo da  $A_{scsg}$ , com a relação de gitagem teórica para um sistema divergente, e com a determinação da área do filtro, determinam-se as restantes áreas (Tabela 7).

**Tabela 7- Relação de gitagem teórica.**

	Gito	Filtro	Canais	Ataques
Relação de gitagem teórica	1	1,6	2	1,5
Área (mm <sup>2</sup> )	2390	3700	4779	3584

#### 4.2.3.2. RELAÇÃO DE GITAGEM REAL

Para obter a relação de gitagem prática foi feita uma medição do cacho, com um paquímetro e obtiveram-se os seguintes resultados (Tabela 8).

**Tabela 8 - Relação de gitagem calculada a partir da medição do cacho.**

	Gito	Filtro	Canais	Ataques
Área (mm <sup>2</sup> )	2427	2849	4892	9605
Relação de gitagem	1	1,2	2	4

Com estes resultados nota-se que os valores das áreas estão, no geral, mais elevados do que na teoria, principalmente a área dos ataques. Isto sugere, além da existência de diversos erros, relacionados com a leitura do paquímetro, as suas limitações de acesso a determinadas zonas e o sobredimensionamento causado pelas rebarbas, uma relação de gitagem típica para uma redução da turbulência.

De realçar que a área do filtro em causa nas medições é a área útil. Nos cálculos anteriores, assume-se que a área útil é a área total do filtro, o que na prática não é verdade. A área é diminuída devido à necessidade de fixação deste na moldação.

No projeto inicial da empresa, foram considerados ataques com uma área menor do que a teórica devido à necessidade da separação das peças no abate. Na fase de industrialização do produto os ataques foram alterados para a configuração atual.

Um possível foco de atuação será a redução da área dos ataques ou possivelmente um aumento da área do filtro.

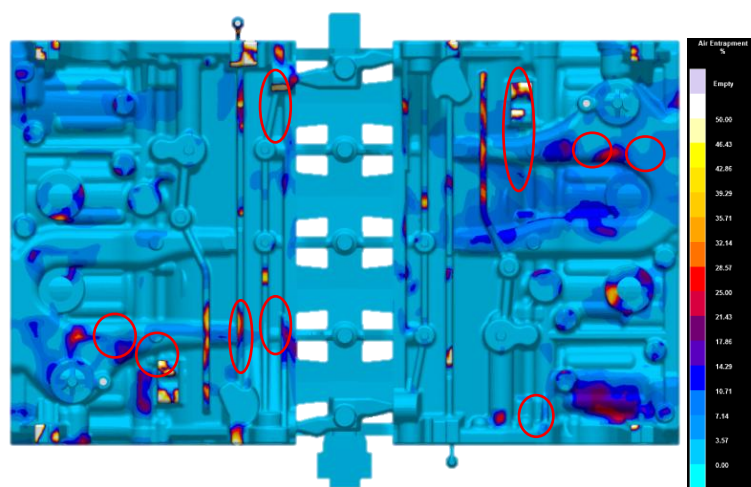
### 4.3. SIMULAÇÕES

#### 4.3.1. ATUAL

Foi feita uma simulação, no *software MagmaSoft*, de um sistema base, e analisados os critérios da temperatura, aprisionamento de gás, *Fill Tracer* e velocidade.

Na Figura 24 é avaliado o critério de aprisionamento de gás e pode verificar-se que a 100% de enchimento, as zonas a amarelo e branco são as mais susceptíveis para a ocorrência de aprisionamento de gás e estão assinaladas a vermelho. A escala utilizada foi de 0 a 50%, o

que permite dar um maior ênfase às zonas críticas. O aprisionamento de gás gerado pode contribuir para o aparecimento de bolhas.



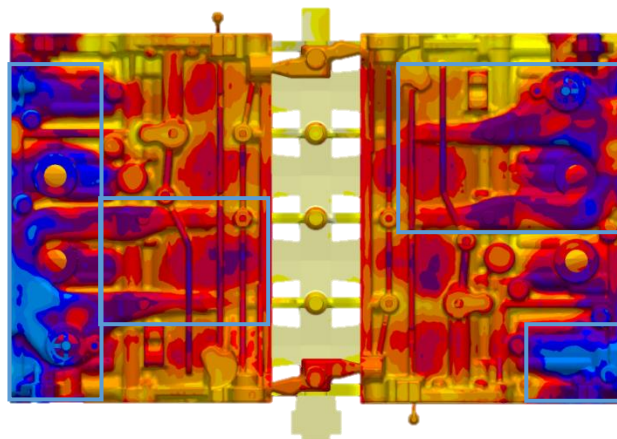
**Figura 24 – Avaliação do final do enchimento através do critério *Air Entrapment*. A vermelho destacam-se as zonas críticas de aprisionamento de gás no sistema atual.**

Através da Figura 24, pode notar-se que as zonas assinaladas a vermelho coincidem com as zonas identificadas anteriormente como críticas para a ocorrência de bolhas, ou seja, o resultado da simulação, em relação ao aprisionamento de gás, aproxima-se da realidade em termos de ocorrência de bolhas.

O tempo de enchimento está presente na Figura 24 e é de 12.162s. Este valor é um dado automático do *software*, e nos ensaios todos efetuados a variação não foi muito significativa, tendo variado de 12 a 13 segundos.

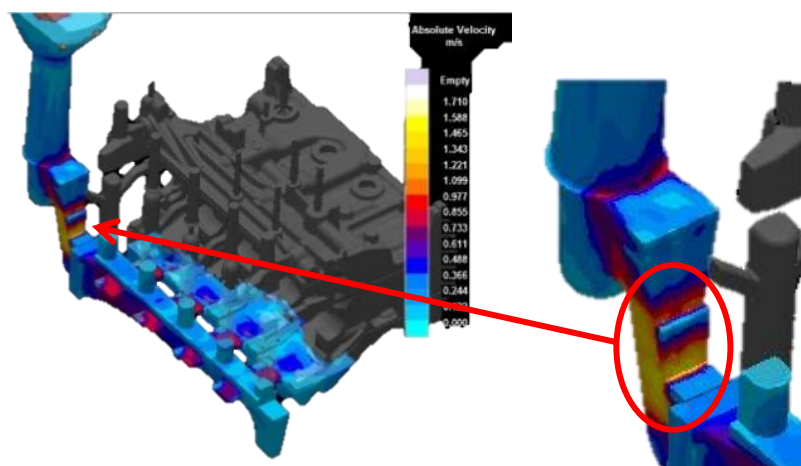
Na Figura 25, é apresentada a avaliação do critério da temperatura a 100% de enchimento e numa gama entre 1188°C e 1425°C. Esta gama de temperaturas corresponde, respectivamente, à temperatura eutética e à temperatura de líquidus.

Nas zonas a azul mais claro está representada a temperatura mais baixa do metal. Pode verificar-se na figura que a zona mais crítica do modelo 1 é a zona do retorno de óleo, enquanto no modelo 2 aparece mais metal frio numa zona mais afastada deste.



**Figura 25 – Avaliação do final do enchimento através do critério da temperatura. Os quadrados azuis destacam as zonas críticas de temperatura mais baixa no sistema atual.**

Na Figura 26 é apresentada a avaliação do critério da velocidade a 18% de enchimento. Esta percentagem foi escolhida de modo a corresponder ao início do enchimento da peça.

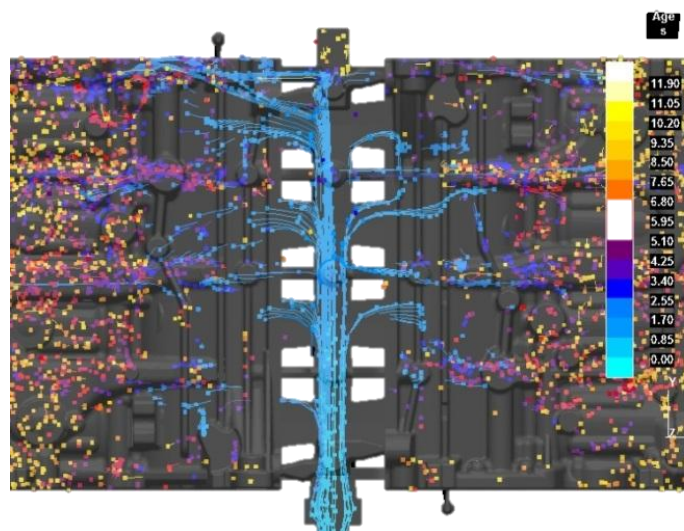


**Figura 26 – Avaliação da velocidade a 18% de enchimento. O círculo vermelho destaca a zona com velocidade mais elevada do sistema atual.**

Como se pode ver na Figura 26, a zona de estrangulamento de metal é na seção antes do filtro ao contrário do que refere a bibliografia, que aponta a zona de estrangulamento para a base do gito de descida ou ataques. Após a medição manual do cacho foi possível verificar este efeito, pelo que já se esperava este acontecimento.

A Figura 27 representa o critério *Fill Tracer* perto do fim do enchimento no sistema atual. A azul estão representadas as partículas mais recentes, e a amarelo as partículas com tempos mais elevados.



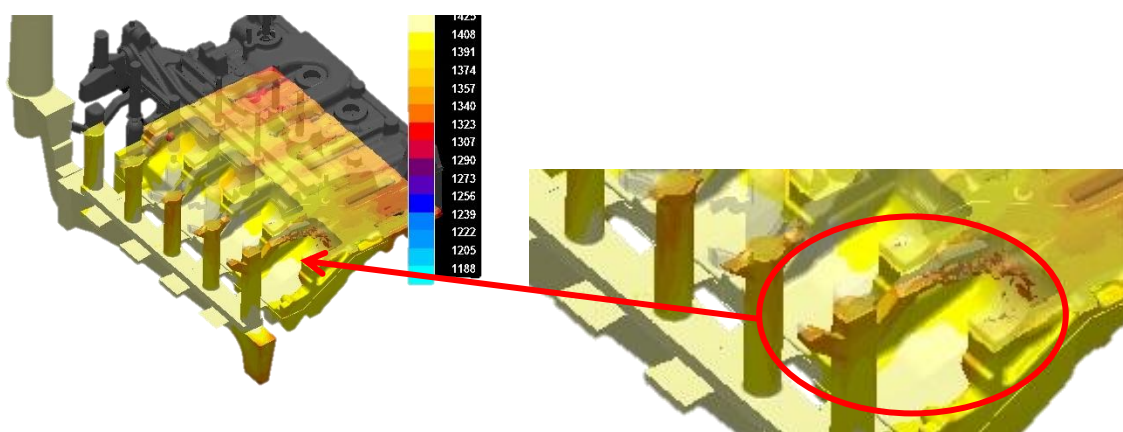


**Figura 27 – Avaliação do enchimento pelo critério *Fill Tracer* perto do fim do enchimento no sistema atual.**

Pela figura, é notória a entrada preferencial de metal mais recente (representado a azul claro) pelo fim do canal principal ao invés de uma distribuição mais uniforme.

Um possível factor de melhoria será realizar modificações que permitam uma distribuição mais uniforme de metal mais recente pela peça.

Na Figura 28, através do critério da temperatura com a opção *X-Ray* ativada, podemos verificar um enchimento inconsistente, como dava a entender a figura anterior.



**Figura 28 – Avaliação do enchimento do sistema de gitagem atual através do critério da temperatura, com a opção *X-Ray* ativada.**

Como a seção do canal de distribuição vai diminuindo, e a área dos ataques inferiores é a mesma, a velocidade no fim do canal é menor e a pressão é maior (Lei de Bernoulli),



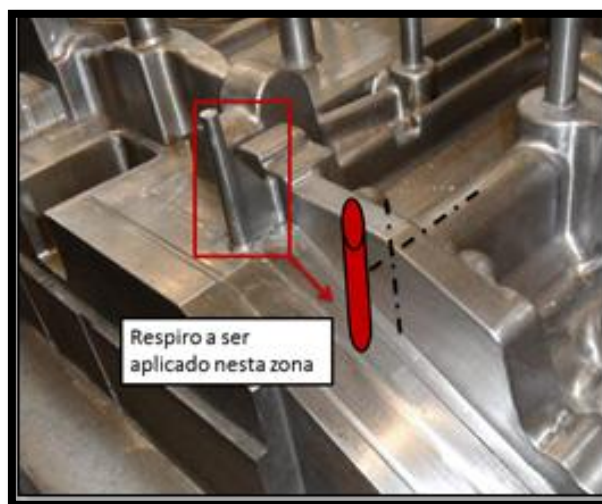
aumentando o caudal nessa zona. Este efeito pode ser também verificado pela Figura 26. Os primeiros ataques inferiores apresentam uma cor mais avermelhada do que os últimos.

Depois dos resultados da simulação inicial, através da análise dos diferentes critérios, foram estudadas alternativas ao sistema de gitagem.

Como foi possível verificar, o enchimento não é uniforme. As alternativas para melhorar este aspeto são:

- Aumentar a rampa, no canal, que se situa logo após o filtro, para aumentar o fluxo de metal líquido nos primeiros ataques;
- Criar um raio no início dos primeiros ataques para obter o mesmo efeito anterior;
- Diminuir progressivamente a área dos ataques de modo a igualar a pressão e a velocidade em todos os ataques, mantendo o caudal constante, e também uniformizar a distribuição de metal mais recente pela peça. A diminuição dos ataques já havia sido sugerida no cálculo anterior da relação de gitagem.

Quanto à zona H7, espera-se obter uma melhoria em termos de ocorrência de bolhas, através da colocação de um respiro na face lateral da peça como mostra a Figura 29.



**Figura 29 – Esquema do procedimento para aplicação de um respiro na face lateral junto a H7.**

Este respiro foi feito com 14mm de diâmetro e a mesma geometria do que está assinalado com uma caixa vermelha na figura acima.

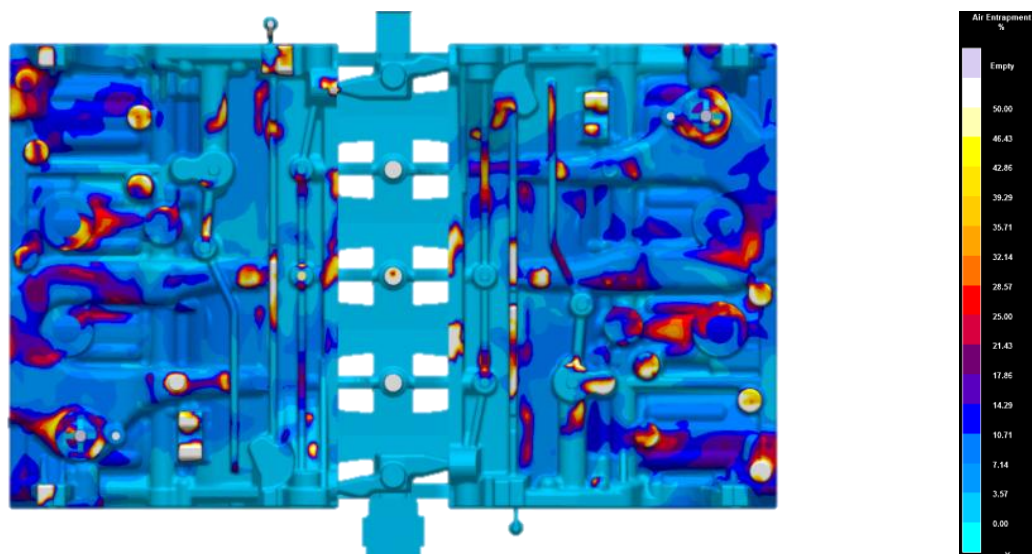
Em relação ao estrangulamento na zona anterior ao filtro, pretende-se simular um aumento dessa área de modo a que esta seja maior do que a área do topo do gito, onde, segundo a bibliografia, deveria estar o estrangulamento.

### 4.3.2. ETAPA 1

Mediante os resultados obtidos anteriormente, procedeu-se à modelação e posterior simulação das alterações referidas anteriormente.

Nesta primeira etapa foi aumentada a área anterior ao filtro. Este aumento foi limitado pela zona realizada pela caixa de macho, pelas dimensões e localização do poço, e pela fixação do filtro na moldação. No caso extremo, se a área anterior ao filtro fosse igual à área do filtro, este iria deslocar-se livremente pela moldação.

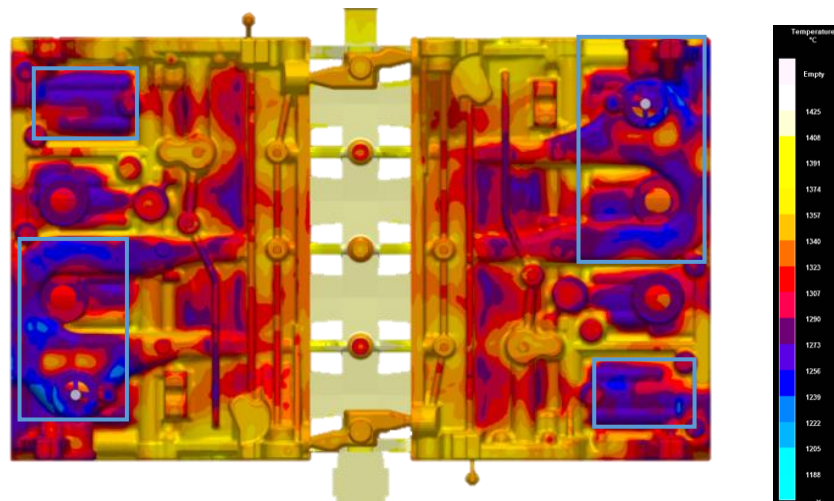
Na Figura 30 é apresentado o critério de aprisionamento de gás com esta modificação.



**Figura 30 – Avaliação do final do enchimento na etapa 1 através do critério *Air Entrapment*.**

Com esta alteração, pode verificar-se que o aprisionamento de gás aparece, tanto nas zonas mais críticas e assinaladas anteriormente, como também noutras zonas onde não se verificava na simulação atual.

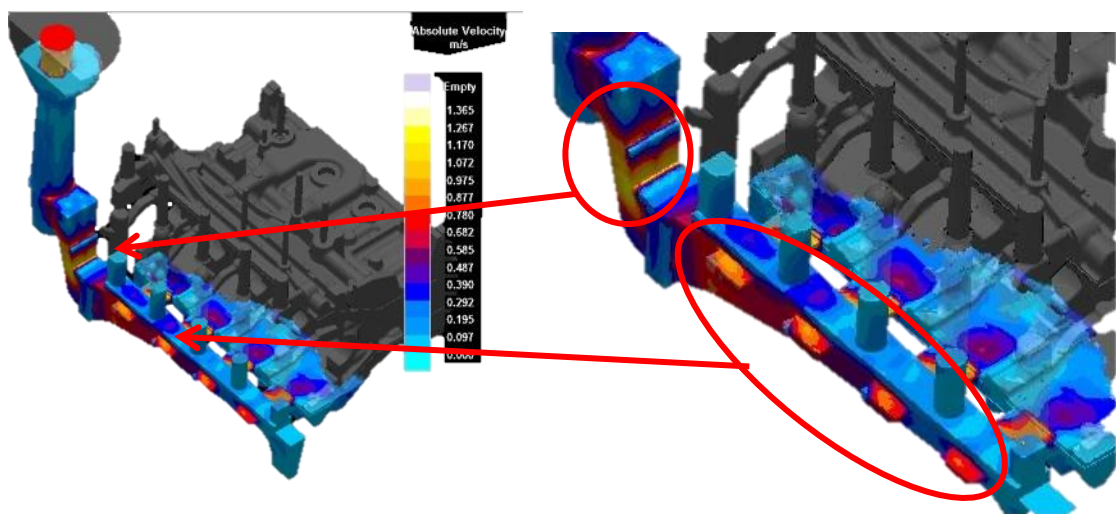
Na Figura 31, destacam-se as zonas com a temperatura mais baixa.



**Figura 31 – Avaliação do final do enchimento através do critério da temperatura. Os quadrados azuis destacam as zonas críticas de temperatura mais baixa na etapa 1.**

Em comparação com a avaliação no sistema atual, houve uma melhoria nas zonas assinaladas. A temperatura apresenta-se mais elevada no geral, apesar das zonas com metal mais frio serem as mesmas que as anteriores.

Na Figura 32 é apresentado o critério da velocidade a 18% de enchimento.



**Figura 32 – Avaliação da velocidade a 18% de enchimento. Os círculos vermelhos destacam as zonas com velocidade mais elevada na etapa 1.**

Como se pode ver na Figura 32 a zona de estrangulamento de metal continua a ser na secção antes do filtro. Visto que a bacia de vazamento e o gito de descida é o mesmo para todas as peças na Funfrap, significa que o seu diâmetro é maior para poder impor o caudal suficiente nas moldações que tenham um cacho mais pesado. Além disso, aumentar ainda

mais a secção anterior ao filtro traria maiores custos de matéria e prejudicaria a fixação do filtro.

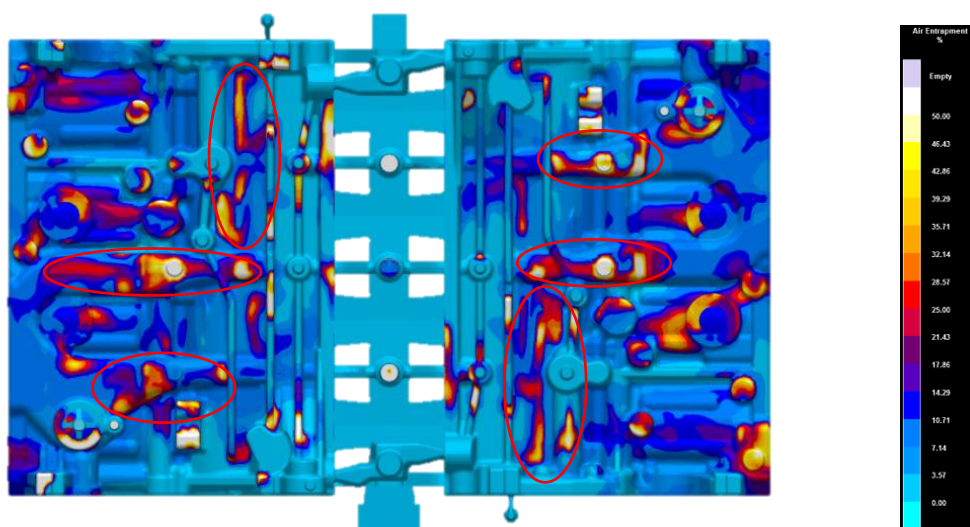
No enchimento nota-se que a velocidade aumentou também nos ataques, em relação ao sistema atual, o que é explicado pela maior entrada de metal originada pelo aumento da secção anterior ao filtro que anteriormente estrangulava o sistema. Este aumento de secção, como se pôde observar pelas figuras anteriores, provocou dois efeitos distintos. Por um lado, com o aumento do caudal e velocidade nos ataques, foi provocado um maior aprisionamento de gás, por outro lado, este aumento de velocidade e de caudal permite ao metal chegar ao topo da peça mais quente e diminuir a probabilidade de ocorrência de metal frio.

Na etapa seguinte modificou-se a área após o filtro aumentando a rampa no canal de distribuição, como referido anteriormente, mantendo a área anterior ao filtro como na etapa 1. Com isto espera-se um maior fluxo de metal líquido nos primeiros ataques inferiores.

### 4.3.3. ETAPA 2

Após as simulações anteriores, diminuiu-se a secção posterior ao filtro esperando uma distribuição maior de metal para os primeiros ataques e analisaram-se novamente os mesmos critérios.

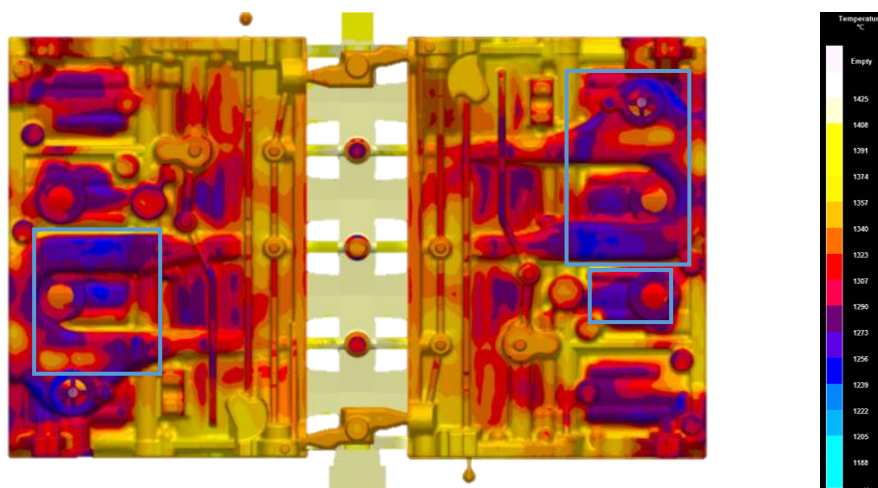
Na Figura 33 é apresentado o critério de aprisionamento de gás com esta modificação.



**Figura 33 – Avaliação no final do enchimento do sistema de gitagem, através do critério *Air Entrapment*, na etapa 2.**

Pode verificar-se que em comparação com as etapas anteriores, no critério de aprisionamento de gás com esta alteração, os resultados mostram um agravamento nas zonas assinaladas e um pouco por toda a face da peça. O aumento do caudal fez com que a velocidade aumentasse, assim como a turbulência e potenciou o aprisionamento de gás.

Na Figura 34, ao analisar o critério da temperatura, pode constatar-se que o metal chega ainda menos frio às zonas identificadas anteriormente e está melhor distribuído em relação às etapas anteriores.

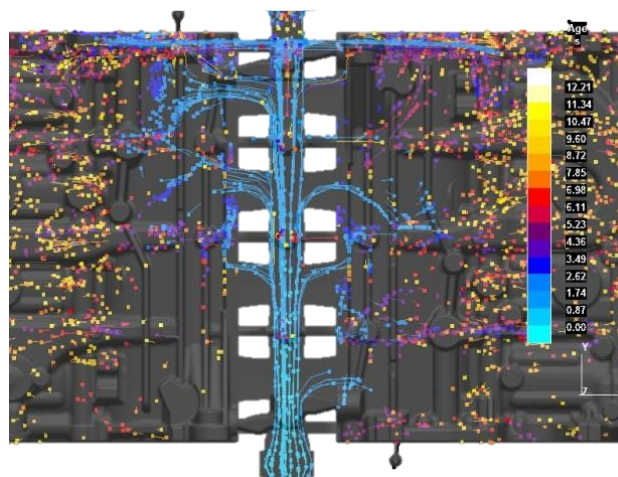


**Figura 34 – Avaliação do final do enchimento através do critério da temperatura na etapa 2.**

O caudal aumentou nesta modificação, o que justifica o metal mais quente no fim do enchimento.

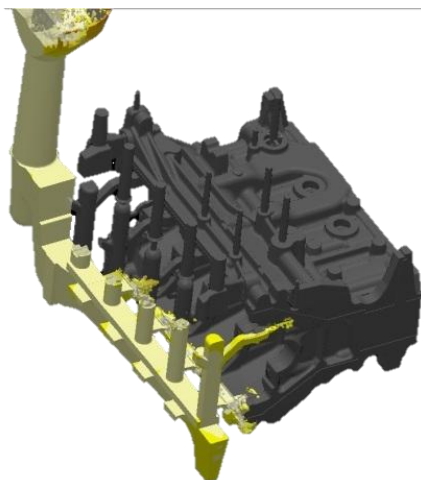
Através da Figura 35 nota-se, similarmente à Figura 27, a entrada preferencial de metal mais recente pelo fim do canal principal.





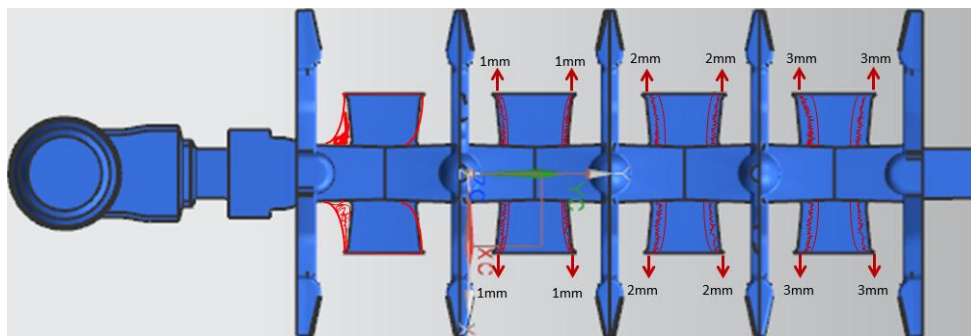
**Figura 35 – Avaliação do enchimento pelo critério *Fill Tracer* perto do fim do enchimento na etapa 2.**

Com esta diminuição da área após o filtro em  $632\text{mm}^2$ , não se verificaram melhorias em termos de entrada de metal mais recente pelos primeiros ataques como esperado, mas o aumento de velocidade no canal de distribuição e a entrada ainda mais acentuada pelo fim do canal como se pode confirmar pela Figura 36.



**Figura 36 – Avaliação do enchimento do sistema de gitagem através do critério da temperatura com a opção *X-Ray* ativada na etapa 2.**

Após o estudo das possíveis alterações a fazer no sistema, alterou-se a geometria dos primeiros ataques colocando um raio e reduziu-se a secção dos ataques posteriores em 5%, como mostra a Figura 37. Além disso manteve-se a diminuição da secção após o filtro como o sistema original devido ao aparecimento de bolhas.



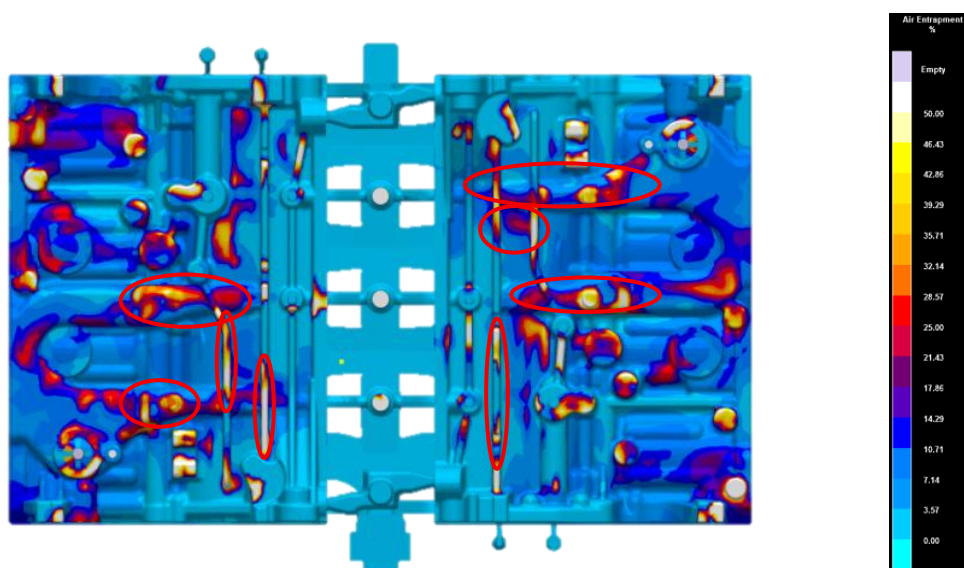
**Figura 37 – Desenho de um raio nos primeiros ataques e redução de 5% nos ataques posteriores para modificação na placa molde.**

Com esta modificação do raio nos primeiros ataques espera-se obter, novamente, uma maior entrada de metal mais recente pelos ataques iniciais, e com a redução dos ataques posteriores pretende-se uma distribuição mais uniforme de metal pela peça no enchimento.

#### 4.3.4. ETAPA 3

Nesta etapa foram consideradas as alterações referidas na etapa 2.

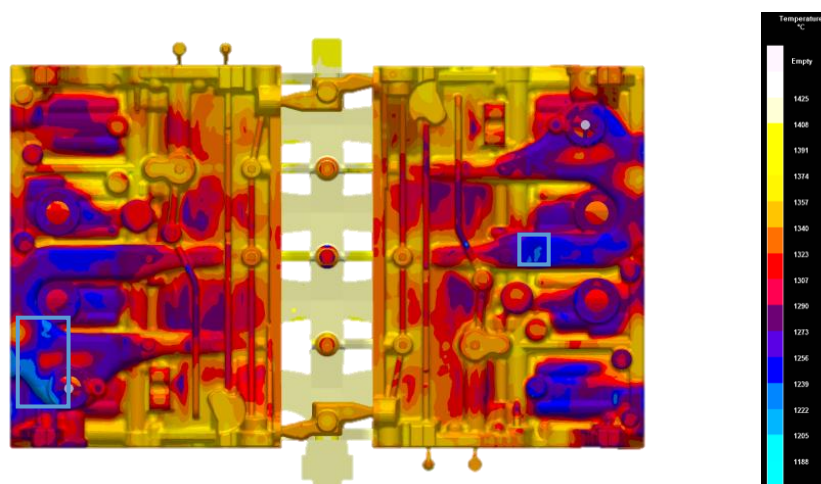
Na Figura 38 pode verificar-se que, com estas alterações, o sistema está tão propenso ao aprisionamento de gás como na etapa anterior, inclusive nas zonas mais críticas da peça, como assinalado a círculos vermelhos.



**Figura 38 – Avaliação do final do enchimento através do critério *Air Entrapment* na etapa 3.**

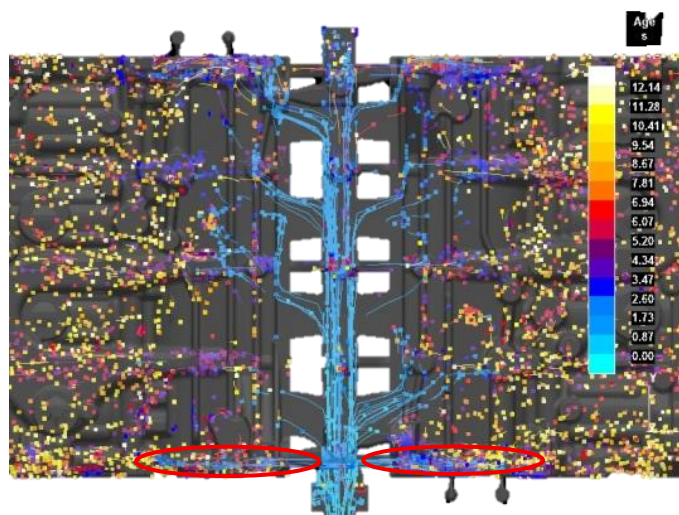
Por outro lado, tendo em conta a Figura 39, confirma-se uma melhoria significativa em

termos da distribuição de temperatura pela face da peça. As zonas do *RO2* continuam a ser as zonas com metal mais frio, mas nesta etapa a temperatura lida nessas zonas é maior do que na simulação inicial e mais próxima da etapa anterior, com a vantagem da redução de matéria no sistema de gitagem ao invés do aumento.



**Figura 39 – Avaliação do final do enchimento através do critério da temperatura. Os quadrados azuis destacam as zonas críticas de temperatura mais baixa na etapa 3.**

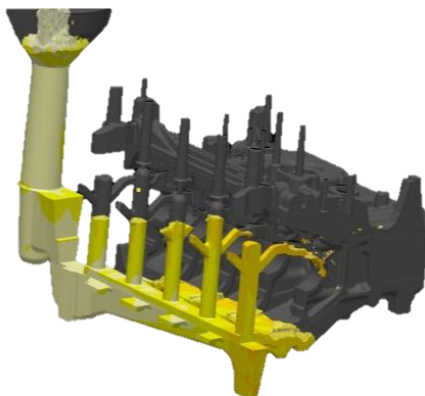
Pela Figura 40, pode notar-se também uma distribuição mais uniforme de metal mais recente por toda a face da peça, ao contrário do que acontecia previamente às alterações efetuadas onde se encontrava maioritariamente no fim do canal. De realçar a zona assinalada, onde, em todas as etapas anteriores, não se verificava a entrada de metal mais recente.



**Figura 40 – Avaliação do enchimento pelo critério *Fill Tracer* perto do fim do enchimento na etapa 3.**



Na Figura 41 podemos confirmar que o enchimento é mais uniforme, devido à redução progressiva dos ataques, embora se note ainda o maior caudal na zona final do canal.



**Figura 41 – Avaliação do enchimento na etapa 3 através do critério da temperatura, com a opção X-Ray ativa.**

Estas alterações em relação à etapa anterior apresentam uma vantagem muito significativa que é o facto de se retirar peso ao sistema, ao invés de acrescentar. Além disso, a separação das peças no quebra-gitos é mais facilitada, podendo reduzir outros defeitos provocados pela ação de separação (peças matraqueadas). Em termos de resultados das simulações esta etapa apresenta-se como uma boa alternativa para a redução do defeito metal frio embora em termos de aprisionamento de gás não se verifiquem melhorias. Porém, estando os dois defeitos agregados, um enchimento uniforme, com estas alterações, pode reduzir os dois defeitos.

Como se pode verificar na etapa 4, com o acompanhamento do vazamento, verificou-se a entrada de metal pelos respiros mais próximos da bacia. Se esta for a causa principal da ocorrência de bolhas nos fundidos, como se poderá admitir pela Figura 42, as alterações anteriores com o correto vazamento, impedindo o metal de entrar pelos respiros deve reduzir os dois defeitos.

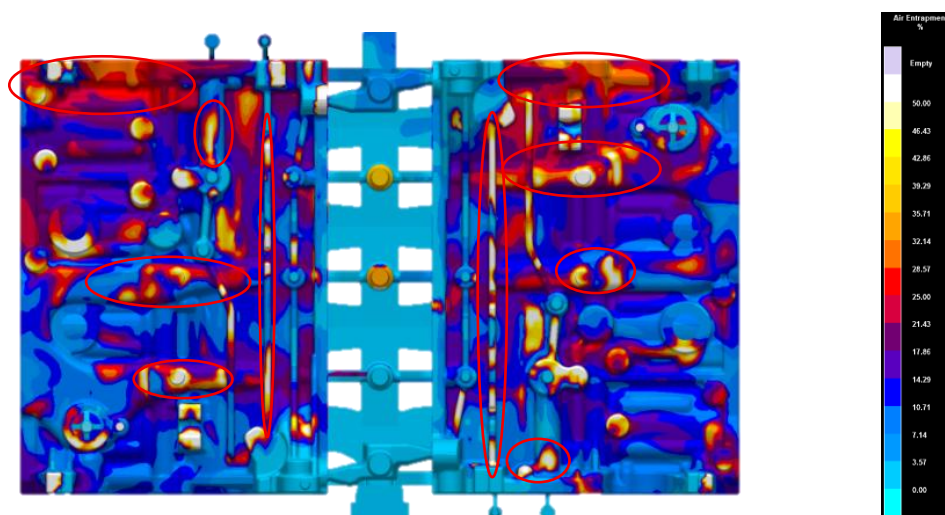
#### **4.3.5. ETAPA 4**

Durante o acompanhamento do ciclo de produção, mais precisamente na fase do vazamento, verificou-se que sistematicamente, o metal transvazava e havia uma forte possibilidade de entrar pelos respiros, o que poderia agravar a ocorrência de bolhas, como referido no diagrama de Ishikawa da Figura 15. Embora na prática não se consiga ver

completamente a parte superior da moldação devido ao peso de carga notava-se, num grande número de moldações, que o metal transvazava e ia em direção aos respiros centrais, que estão muito próximos da bacia de vazamento.

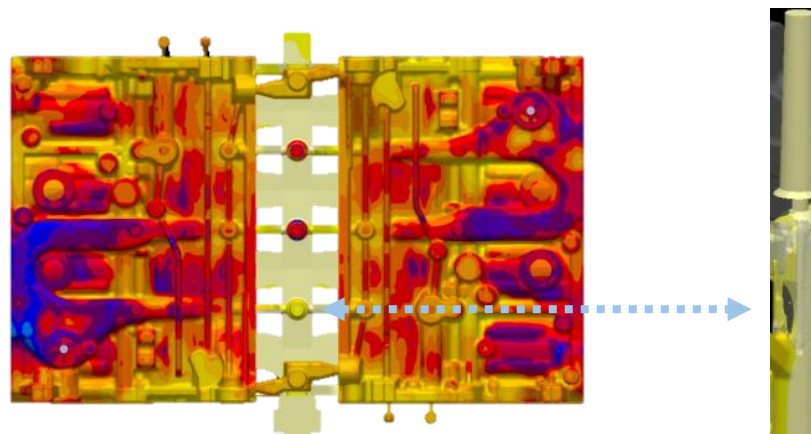
Fez-se, então, uma simulação idêntica à efetuada na Etapa 3, em que a meio do vazamento entra metal pelo respiro mais próximo da bacia de vazamento. Esta simulação já inclui o respiro lateral como se pode ver nas figuras seguintes.

Na Figura 42 é apresentado o critério de aprisionamento de gás e pode verificar-se um agravamento em relação às etapas anteriores. Além das zonas críticas serem agravadas, as zonas mais afastadas da bacia também são das mais afetadas com esta alteração, o que pode ser explicado pelo impedimento na saída dos gases pelo respiro e o seu seguimento para a peça. Este fenómeno pode ser visto através da Figura 43 do lado direito.



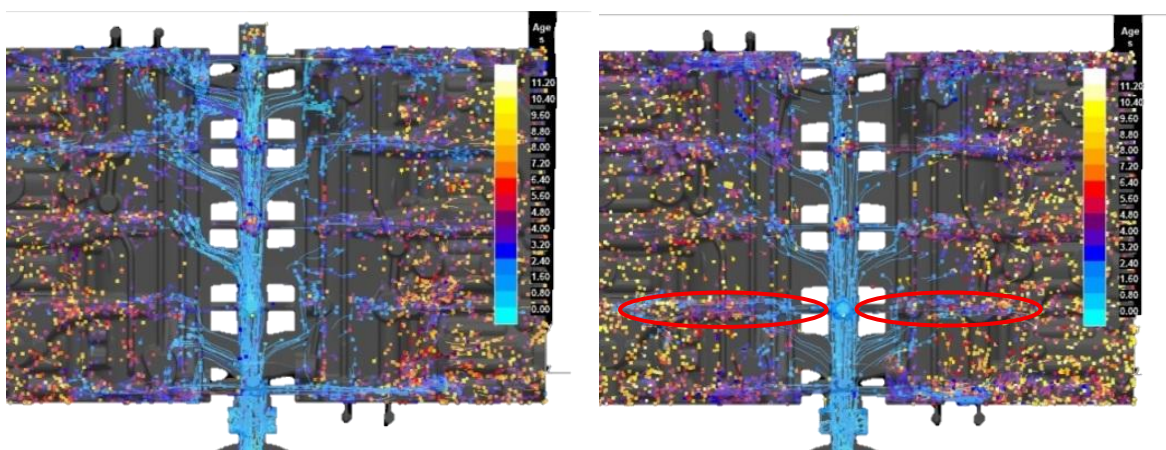
**Figura 42 - Avaliação do final do enchimento através do critério *Air Entrapment*. Os círculos vermelhos destacam as zonas críticas de aprisionamento de gás na etapa 4.**

Na Figura 43 do lado esquerdo não se verificam agravamentos neste critério da temperatura. Porém, uma análise ao enchimento mostra que na coluna que leva o metal aos ataques superiores (Figura 43 do lado direito), há aprisionamento de ar, provocado pela entrada do metal pelo respiro, que posteriormente será transferido para a peça.



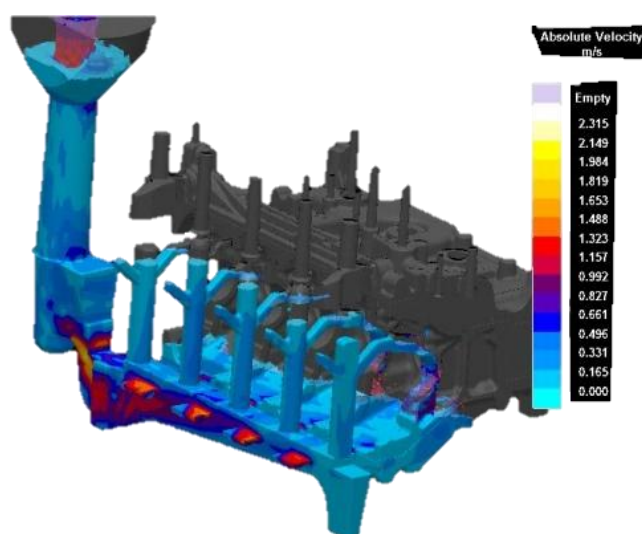
**Figura 43 - Avaliação do final do enchimento através do critério da temperatura na etapa 4 (esq.) e um pormenor do enchimento através do mesmo critério com a opção *X-Ray* ativa (dir.).**

Na Figura 44, antes da entrada de metal pelo respiro, nota-se uma boa distribuição de metal pela peça, e na fase final verifica-se a entrada de metal mais recente pelos canais que estão ligados ao respiro em causa.



**Figura 44 - Avaliação do enchimento pelo critério *Fill Tracer*, antes de entrar metal pelo respiro (esq.) e perto do fim do enchimento (dir.) na etapa 4.**

Na Figura 45 é apresentada a avaliação da velocidade a 22% de enchimento na etapa 4.



**Figura 45 - Avaliação da velocidade a 22% de enchimento na etapa 4.**

Nos ataques, como se pode verificar na figura anterior, a velocidade mantém-se similar em cada um deles, o que significa que o objetivo de conseguir um enchimento uniforme foi conseguido.

Esta simulação sugere um controlo eficaz no vazamento de modo ao caudal ser adequado e o metal não transvazar.

#### **4.4. ENSAIOS**

Após as simulações foi decidido fazer um ensaio com as alterações referidas na etapa 3 de modo a validar experimentalmente as mesmas. Porém, devido maioritariamente à indisponibilidade da placa molde, apenas foram feitos dois ensaios do sistema completo, incluindo o modo de vazamento aplicado em série visando evitar a saída de metal da bacia de vazamento (Ensaio 9 e 17).

São referidos outros ensaios devido à alteração no modo de vazamento que foi aplicado em série (a partir do ensaio 5) onde que se reduz o caudal para o metal não transvazar e formar bolhas no fundido. Por esse motivo, todos os vazamentos a partir do primeiro ensaio foram acompanhados, estando na Tabela 9 um resumo das alterações efetuadas em cada ensaio.

**Tabela 9 – Resumo das alterações efetuadas em cada ensaio.**

Alterações	Etapa 3				Etapa 4
	Respiro	Raio nos primeiros ataques	Redução dos ataques	Rampa no canal	Modo de vazamento
<b>Ensaio 1, 2, 3, 4</b>	✓	✓	✗	✗	✗
<b>Ensaio 5-8, 10-16</b>	✓	✗	✗	✗	✓
<b>Ensaio 9, 17</b>	✓	✓	✓	✓	✓

#### 4.4.1. ENSAIO 1, 2 E 3

Foram realizados três ensaios mantendo as mesmas condições. A aplicação de um respiro lateral de modo a reduzir as bolhas em *H7*, assim como o raio nos primeiros dois ataques para direcionar o metal para essa zona foram efetuados na placa molde de série, através da criação de postigos e substituição dos originais. A redução dos ataques não foi efetuada ao mesmo tempo devido à indisponibilidade da placa molde pelo tempo necessário a essa modificação.

Nestes primeiros ensaios apenas com estas modificações, verificou-se um aumento significativo e progressivo da quantidade de peças sucata com bolhas e metal frio (Figura 48), o que colocou em causa as modificações efetuadas. Porém, durante o acompanhamento do ciclo de produção foi verificado um número elevado de moldações com arrancamento de areia nas costas da moldação, pelo que, no ensaio 4 se retiraram duas das agulhas situadas perto do centro dos modelos a fim de corrigir esse efeito e verificar se este seria a origem deste aumento, o que se viria a verificar.

Em relação aos parâmetros da areia, nos três ensaios, não há valores fora da gama, pelo que a causa mais provável terá sido o número de agulhas presentes na moldação superior.

#### 4.4.2. ENSAIO 4

Neste ensaio foram retiradas duas agulhas centrais para não fragilizar a areia na meia moldação superior.

Após análise da sucata, verificou-se uma diminuição da percentagem de bolhas e metal frio (Figura 48), o que pode significar que as modificações efetuadas anteriormente na placa molde não foram a causa direta do aumento dos defeitos. Para tentar confirmar esse fato foi retirado no ensaio 5, o raio que se tinha adicionado nos primeiros ataques.

Também se verificou que na maioria dos vazamentos, algum metal saía da bacia de vazamento, e poderia entrar pelo respiro furado com a broca de 18mm mais próximo da bacia, pelo que se diminuiu o caudal durante o vazamento de modo a evitar que o metal transbordasse e entrasse pelo respiro causando bolhas como foi visto anteriormente na etapa 4.

Numa análise aos parâmetros da areia verificou-se que mais uma vez não havia parâmetros fora da gama, o que remete a causa da falta de resistência da areia, que provoca os arrancamentos, para o número de agulhas existentes, aliadas à proximidade entre si.

#### 4.4.3. ENSAIO 5 E 6

Nestes ensaios retirou-se o raio nos primeiros ataques, colocaram-se novamente as agulhas e controlou-se o vazamento de modo a que o metal não transbordasse da bacia para os respiros.

No ensaio 5, após a análise da sucata, não se verificaram peças com bolhas, e em relação ao metal frio a percentagem foi mínima (Figura 48). Estes resultados vão de encontro ao que se esperava aquando a análise da etapa 4 em que se verificava um agravamento no critério de aprisionamento de gás quando o metal entrava pelo respiro. Como referido, neste ensaio foi controlado o vazamento de modo ao metal não transvazar. Além disso, um aspeto que deve ser referido é a diminuição da pressão exercida pelo gás dentro da moldação que faz aumentar a velocidade de enchimento (Figura 46) e por conseguinte o metal chega mais cedo e a maior temperatura à superfície das peças diminuindo a probabilidade de ocorrência de metal frio.



**Figura 46 – Avaliação da velocidade absoluta num ponto em cada modelo, a 98% de enchimento, através da função *Picking* do *MagmaSoft*. À esquerda é apresentado o critério da velocidade na etapa 4, e à direita na etapa 3.**



No ensaio 6, a percentagem de metal frio foi ainda menor e a percentagem de bolhas foi equivalente ao ensaio 5, o que revela uma certa consistência nos resultados.

Os parâmetros da areia nestes dois ensaios encontram-se todos dentro das gamas recomendadas.

Estes resultados revelam que, apenas com a alteração no modo de vazamento, em que o metal permanece sempre na bacia sem transvazar, é possível eliminar por completo as bolhas e reduzir o metal frio. Esta pode ser a principal causa do aparecimento de bolhas no fundido.

#### **4.4.4. ENSAIO 7 E 8**

No ensaio 7, devido a algumas moldações com as costas partidas apenas na zona do modelo 2 no ensaio anterior, retirou-se uma agulha que havia sido reposta nos ensaios 5 e 6 e mantiveram-se as condições destes ensaios.

Após análise da sucata pode verificar-se que aumentou ligeiramente a percentagem de bolhas e metal frio (Figura 48).

No ensaio 8 mantiveram-se as mesmas condições do ensaio 7 e verificou-se um decréscimo acentuado (-609% na percentagem de bolhas e -402% na percentagem de junta fria) em relação ao presente ano de 2013.

Os parâmetros da areia encontravam-se novamente dentro das gamas.

#### **4.4.5. ENSAIO 9**

Neste ensaio foram efetuadas as alterações sugeridas na etapa 3, para validação experimental, ou seja, foi colocado o raio nos primeiros ataques e a rampa após o filtro no canal de distribuição, o respiro H7 manteve-se sempre, e manteve-se também o modo de vazamento em que o metal não pode transvazar.

Apesar do ensaio ter sido com menor número de moldações em relação à produção em série, não se verificaram peças com metal frio, e a percentagem de bolhas foi superior à média do ano de 2013 (Figura 48).

Os parâmetros da areia mantiveram-se sempre dentro das gamas recomendadas.

Durante o acompanhamento do ensaio, ocorreu uma paragem na fusão quando ainda faltavam vaziar metade das moldações e só se retomou o vazamento uma hora depois. Isto poderia ter influenciado negativamente a ocorrência de bolhas devido à absorção de humidade por parte dos machos. No entanto, essas peças foram separadas para posterior análise, e verificou-se que todas elas estavam conformes.

Com esta alteração no modo de vazamento perde-se um pouco em cadência de produção devido à média do tempo de vazamento ser maior mas o resultado revela-se positivo no que se refere ao metal frio, e ainda um pouco questionável em relação às bolhas. Por esse motivo foi realizado o ensaio 17 nas mesmas condições mas com um maior número de moldações.

#### **4.4.6. ENSAIO 10, 11, 12, 13, 14, 15 E 16**

Nestes ensaios, as condições foram as mesmas do que as utilizadas nos ensaios 7 e 8, e os parâmetros da areia mantiveram-se dentro das gamas recomendadas.

Os resultados conjuntos destes ensaios mostram uma redução de ambos os defeitos e também uma diminuição de sucata total em relação à média do ano 2013 até à data dos ensaios (Figura 48).

#### **4.4.7. ENSAIO 17**

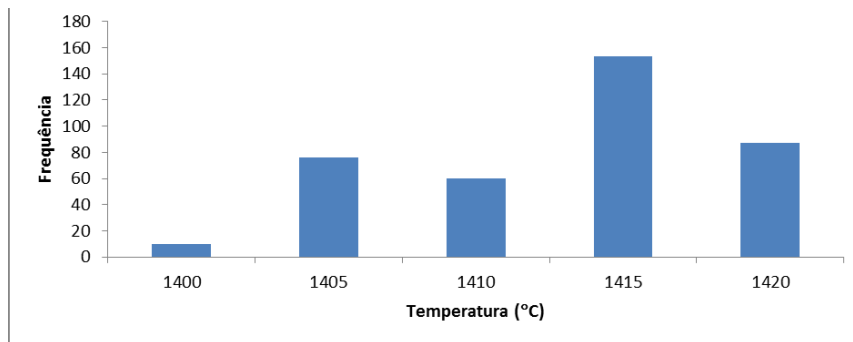
Como referido anteriormente este ensaio engloba todas as alterações e condições efetuadas no ensaio 9.

Como resultado, a percentagem de metal frio foi ínfima e a percentagem de bolhas foi inferior à média do ano 2013 (Figura 48) mas próximo do resultado obtido na produção em série. Em termos de sucata total, os resultados foram piores do que a média de 2013. Portanto, o caminho seguido revelou os melhores resultados em termos de junta fria, incitados pelas modificações no enchimento, e manteve os resultados no que se refere às bolhas.



#### 4.5. TEMPERATURAS DE VAZAMENTO

De modo a ter uma visão geral das temperaturas de vazamento, foi criado um Histograma, presente na Figura 47, que mostra a frequência de temperaturas de cada colher antes do vazamento, englobando todas as datas dos ensaios descritos anteriormente.



**Figura 47 – Histograma das temperaturas de cada colher antes do vazamento.**

A análise estatística das temperaturas encontra-se na Tabela 10.

**Tabela 10 – Gama da variação real das temperaturas de vazamento.**

	Min	Máx	Média	Desvio Padrão
Temperatura (°C)	1400	1420	1411	5,6

A partir da Figura 47 podemos ver que as temperaturas mais predominantes são as temperaturas acima de 1410°C. Porém, esta gama de temperaturas tem como limite máximo 1420°C, que é uma temperatura inferior à temperatura de redução do SiO<sub>2</sub> em Si e em CO através do carbono, calculada a partir da Equação 12.

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{27486}{15,47 - \log \frac{\%Si}{\%C^2}} - 273,15 \quad \text{Equação 12}$$

Uma temperatura de vazamento superior poderia ser benéfica em termos de probabilidade de ocorrência de junta fria e no impedimento da redução da sílica mas teria o efeito inverso na formação de bolhas e na penetração de metal nos machos e na moldação devido ao aumento da fluidez [3].

#### 4.6. ANÁLISE GLOBAL E ESTIMATIVAS

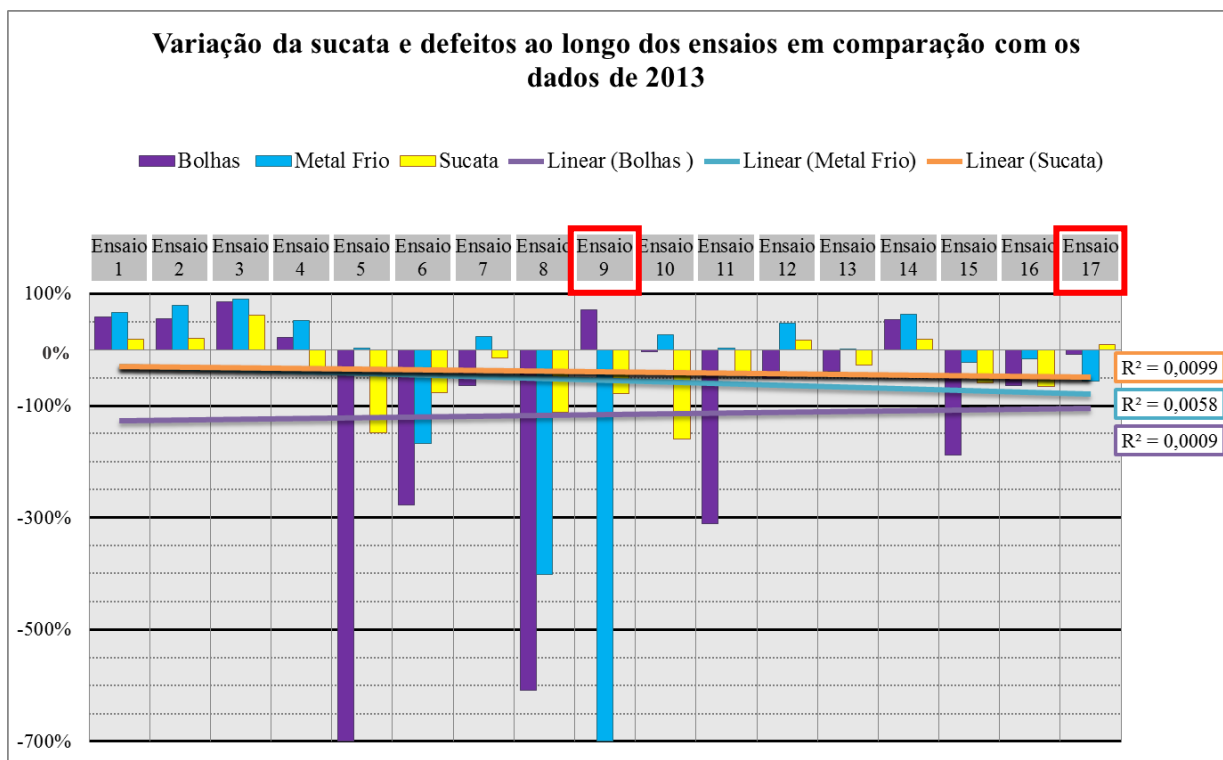
Na Figura 48 está representado um gráfico com a variação da percentagem de sucata e defeitos ao longo dos ensaios realizados em comparação com os dados de 2013 até essa altura.

No gráfico, 0% corresponde à média do ano 2013 até à primeira data dos ensaios. Uma variação positiva em qualquer dos parâmetros significa que a sua percentagem aumentou e vice-versa. A variação da percentagem de bolhas para cada ensaio foi calculada através da Equação 13.

$$\text{Variação da \% de bolhas} = \frac{(\% \text{ de bolhas} - \% \text{ média de bolhas no ano de 2013})}{(\% \text{ de bolhas})} \times 100$$

**Equação 13**

O mesmo foi feito para a variação da percentagem de metal frio e de sucata. O valor de -700% é um valor fictício correspondente à eliminação do defeito.



**Figura 48 - Variação da percentagem de sucata e defeitos ao longo dos ensaios em comparação com os dados de 2013.**

A vermelho encontram-se assinalados os ensaios de validação experimental das alterações efetuadas na placa molde (correspondentes à etapa 3 das simulações) com as condições de vazamento (referidas na etapa 4) já aplicadas em série a partir do ensaio 5, em que se deve ajustar todos os parâmetros de modo a vazar sempre dentro da bacia de vazamento e evitando a saída de metal para o respiro.

As linhas representadas no gráfico são um ajuste aos valores obtidos da variação e, apesar de não ser um bom ajuste aos dados, estas linhas mostram que a variação de sucata, bolhas e metal frio se manteve sempre abaixo do valor de referência, que é a média do ano de 2013, no decorrer dos ensaios efetuados e, à exceção da variação da percentagem de bolhas, tanto a percentagem de metal frio como a de sucata tendeu a diminuir ao longo dos ensaios.

De salientar a ausência do defeito metal frio no ensaio 9, o que já era esperado tendo em conta as alterações realizadas e o resultado das simulações, e a sua quase ausência no ensaio 17, feito nas mesmas condições que o ensaio 9.

Quanto ao aparecimento de bolhas, no ensaio 9 foi o único defeito existente. E, apesar da quantidade deste ser diminuta, como o ensaio foi com uma quantidade relativamente pequena de moldações, em termos de percentagem o valor obtido excedeu a média de 2013. Porém, no ensaio 17, nas mesmas condições mas realizado um maior número de moldações, houve uma ligeira diminuição em relação à média de 2013.

Tendo em conta os ensaios realizados, através da modificação no modo de vazamento, foi possível estimar um valor médio, correspondente a uma percentagem conjunta de defeitos, bolhas e junta fria, e comparou-se com a média obtida no presente ano de 2013. Assumindo que o volume de produção mensal se manterá o mesmo, e que o preço por kg de peça é igual a 1 euro (valor fictício), sabendo que cada peça pesa cerca de 51kg, estima-se que o ganho anual da empresa com as alterações efetuadas se poderá situar nas dezenas de milhares de euros.

## 5. CONCLUSÕES

Com o acompanhamento do ciclo de produção do 650 foi possível adquirir um conhecimento mais aprofundado sobre a indústria de fundição.

1. A percentagem de bentonite fora da gama, nem sempre provoca baixa resistência na areia, originando arrancamentos nas costas da moldação superior, e provocando o aparecimento de bolhas. O posicionamento e o número de agulhas na meia moldação superior apresentam também uma grande influência na resistência, nos arrancamentos e por conseguinte no aparecimento de bolhas.
2. Verifica-se a correspondência entre as zonas críticas de ocorrência de bolhas na realidade com as zonas críticas de aprisionamento de gás obtido através do *software MagmaSoft* na simulação inicial do sistema atual. O mesmo acontece em relação ao critério da temperatura para detecção das zonas críticas de ocorrência de metal frio. Isto permite apresentar resultados mais fiáveis aquando as modificações efetuadas.
3. O aumento da área anterior ao filtro revelou ser uma boa opção para a diminuição de metal frio mas traria desvantagens no acréscimo de matéria ao sistema e na origem de bolhas nos fundidos. A rampa criada após o filtro provoca também um aumento de velocidade no sistema e apresenta o mesmo efeito na ocorrência de defeitos e no enchimento.
4. A etapa 3 foi a que apresentou melhores resultados globais. Apesar da desvantagem, em relação à simulação original, no aprisionamento de gás, apresentou vantagens no enchimento, na distribuição de metal mais recente pela peça e na redução de matéria no sistema.
5. A modificação do modo de vazamento aplicada na produção em série, em que se diminui o caudal para fazer um vazamento em que o metal não transvaze e saia da bacia entrando para os respiros, referida na etapa 4, permitiu uma redução, quer dos defeitos estudados quer da sucata em geral. Esta modificação revelou-se uma das principais causas para o aparecimento de bolhas.
6. As alterações efetuadas nos ensaios 9 e 17 evitam a ocorrência de metal frio quase por completo em todas as zonas da peça, e reduzem a percentagem de bolhas e de sucata interna em relação à percentagem obtida em 2013 até à data dos ensaios.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lakshmi Anand K, D. o. *Automobile Technology › Unit 1: Automotive Engines › Basic Engine Components*. Obtido de UStudy: <http://www.ustudy.in/node/4968>. Acedido a 8 de Março de 2013.
- [2] Marine Parts Europe. *Schematic Engine and Installation Components*. Obtido de <http://www.marinepartseurope.com/en/volvo-penta-explodedview-7735450-21-12106.aspx>. Acedido a 12 de Março de 2013
- [3] Roucka, J. (2000). *Casting Alloy Filtration*. Brno: Czech Foundry Society Technological Commission. Pgs: 4-33.
- [4] Silva Ribeiro C. A., “Apontamentos de Fundição”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Porto, 2006. Pgs:57-92; 220:267.
- [5] ASM Handbook, (1986), “Casting”, Vol. 15. Pgs: 257-270; 370-405; 484-516; 737-770; 1280-1336; 1362-1365.
- [6] Zhou Jiyang, P. D. (2009). “Colour Metallography of Cast Iron”. Pgs: 1-47.
- [7] “Gray iron”, (2002). Obtido de: <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=84>. Acedido a 24 de Setembro de 2012.
- [8] IVECO. (2009). Ferro Fundido Cinzento Para Fundição. IVECO Standard.
- [9] Foseco International Ltd. (2000). Foseco Ferrous Foundryman’s Handbook. Great Britain: Butterworth Heinmann. Pgs: 23-40; 146-167.
- [10] Schuster, S. M. (1997). Gauging Green Sand Flowability Helps Predict Mold Quality. Simpson Technologies Corp. Obtido de <http://simpsongroup.com/tech/GaugingGreenSand.pdf>. Acedido a 19 de Outubro de 2012
- [11] DISA Industries A/S. (2007). Turbine Mixer SAM. Obtido de <http://www.metamak.com.tr/wp-content/uploads/2012/03/TURBINE-MIXER-SAM.pdf>. Acedido a 21 de Outubro de 2012.
- [12] NAVSHIPS. (1958). *Foundry Manual*. Washington DC. Obtido de

<http://www.hnsa.org/doc/foundry/>. Acedido a 23 de Outubro de 2012.

- [13] Scott Strobl, Simpson Technologies Corporation. (2000). *The Fundamentals of Green Sand Preparation and Control*. Aurora, Illinois, USA.
- [14] C.W.Ammen. (1979). *The Complete Handbook of Sand Casting*. USA: TAB books - Division of McGraw-Hill. Cap. 2, 9, 11.
- [15] IKO. Description of defects: Surface blowholes.
- [16] Colton, P. J. (2011). “Casting Defects and Design v.2. ME 6222: Manufacturing Processes and Systems”.
- [17] Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. “Defeitos em Fundição”.
- [18] IKO. “Description of defects: Penetration”.
- [19] “Analysis of casting defects”. (1994). American Foundrymen's Society. Cap. 8, 15.
- [20] “Casting Defects - Sand Mold, Metal Casting”. URL: <http://www.iron-foundry.com/casting-defects-pictures.html>. Acedido a 24 de Outubro de 2012.
- [21] Dias, C. (2003-2004). *NDT. Obtido de Qualidade e Ensaios de Materiais*: <http://sme.dcm.fct.unl.pt/u/dias/docencia/Q&EM/>. Acedido a 28 de Março de 2013.
- [22] ASM International. (2009). *Casting Design and Performance*. Materials Park, Ohio: The Materials Information Society. Pgs: 15-17; 79.
- [23] Silva Ribeiro C. A., “Gitagem”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Porto, 2006.
- [24] Emt-india. Obtido de <http://www.emt-india.net/process/foundries/pdf/CDA5.pdf>. Acedido a 18 de Março de 2013.
- [25] Rundman, P. K. *Metal Casting*. Michigan. Pgs: 39-44.
- [26] *Magmasoft Manual*. Germany, 2002.
- [27] U. Ittipon, Sud-Chemie. (2011). *Green Sand Molding Management*. Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. Pg: 85.

## 7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do tempo da Dissertação foi-me possível obter ideias acerca de diferentes propostas que poderiam ser estudadas:

- Nas simulações efetuadas, será importante o estudo da influência do coeficiente de transferência de calor entre a peça, os machos e a moldação, através da simulação com os machos. Isto vai permitir aproximar ainda mais a simulação à realidade e, assim, obter as zonas mais prováveis de ocorrência de cascão para posterior estudo de possíveis causas e alternativas para a sua redução ou eliminação. De modo a prevenir este defeito seria importante fazer também ensaios que visassem alterações no tipo de tinta, na sua massa volúmica e também na sua espessura.

- Grande parte do sistema de gitagem atual é realizada através de macho, pelo que, aumentar qualquer secção nessas zonas implica retirar material à caixa de machos e diminuir a secção obriga a acrescentar material (geralmente por soldadura). Um estudo da possibilidade de criar postigos na caixa de machos, para cada componente do sistema de gitagem, seria vantajoso no sentido de poder manipular todo o sistema mais facilmente. Colocar postigos na caixa de machos poderá ter também o problema do desgaste e da rugosidade superficial mais agravado.